



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
JOÃO FELIPE MENDES GOULART

**ESTUDO COMPARATIVO DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE ANODIZAÇÃO DE
ALUMÍNIO E NANOPARTÍCULA DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO APLICADAS NO
CONCRETO**

TUBARÃO
2021

JOÃO FELIPE MENDES GOULART

**ESTUDO COMPARATIVO DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE ANODIZAÇÃO DE
ALUMÍNIO E NANOPARTÍCULA DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO APLICADAS NO
CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
do Sul de Santa Catarina como requisito parcial
à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof. Dr. Francielen Kuball Silva

TUBARÃO

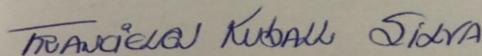
2021

JOÃO FELIPE MENDES GOULART

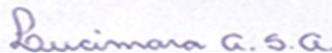
**ESTUDO COMPARATIVO DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE ANODIZAÇÃO DE
ALUMÍNIO E NANOPARTÍCULA DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO APLICADAS NO
CONCRETO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina.

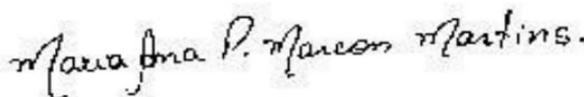
Tubarão, 25 de junho de 2021.



Professora e orientadora Francielen Kuball, Dr.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Prof. Ms. Lucimara Aparecida Schambeck Andrade.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Prof. Dra. Maria Ana Pignatel Marcon Martins.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a toda a minha família que sempre esteve comigo me apoiando e me incentivando em todos os momentos que precisei.

AGRADECIMENTOS

É com muita satisfação que agradeço a todos que participaram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho.

A Deus pelo dom da vida e, pela sabedoria que em mim foi colocado.

Agradeço a meus pais, Marciel da Silva Goulart e Adriana Aparecida da Silva Mendes por todo suporte e apoio ao longo de toda a vida, na minha caminhada universitária e também pelos conselhos dados durante toda esta caminhada e, também a minha irmã Vitória Mendes Goulart por todo apoio ao longo de todo esse tempo.

Agradeço a minha namorada Caroline Marques Silva que me acompanhou, me escutou e soube dar todo apoio e incentivo e ter paciência em todo o longo período de elaboração deste trabalho.

A minha orientadora Prof. Dr. Francielen Kuball Silva que aceitou ser minha orientadora e foi fundamental para a elaboração deste trabalho compartilhando comigo seus conhecimentos sobre o assunto para a elaboração do trabalho e por todo o tempo disponibilizado para execução da pesquisa.

Agradeço a Barbara Menegaz Goulart que se dispôs a ajudar na fabricação da nanopartícula de óxido de alumínio em laboratório durante um longo período de tempo e a Pedro Antônio Pimentel Zapelini por todo suporte e auxílio no laboratório para a moldagem dos corpos de prova.

Agradeço ao laboratório de solos e o laboratório de química da UNISUL por todos os materiais e equipamentos disponibilizados para a execução deste trabalho.

“O esforço é expresso em recompensa, quando a pessoa se recusa a desistir” (Napoleon Hill).

RESUMO

O processo de anodização de alumínio produz um grande volume de lodo que mesmo sendo classificado como um resíduo inerte tem a necessidade de ser depositado em aterros controlados. Devido a enorme quantidade de lodo gerado, o transporte e o destino apropriado geram custos adicionais às empresas. Provavelmente, este lodo proporciona características que podem fazer com que sejam utilizados em diversos processos industriais como uma matéria-prima, pois o mesmo apresenta uma elevada presença de alumina na sua composição, após ser passado por um processo de calcinação que altera as características da composição eliminando sais e hidróxidos alcalinos, que são contaminantes quando inseridos em certos tipos de materiais. Ainda assim, este material na grande maioria das vezes é descartado apenas em aterros sanitários levando a um enorme desperdício de matéria-prima alternativa e potencialmente uma enorme poluição ao meio ambiente. Levando em consideração esse poder de reutilização do lodo de anodização de alumínio (LAA), este trabalho tem como objetivo investigar o efeito da incorporação de 2% de nanopartículas de óxido de alumínio e lodo de anodização de alumínio no concreto para se analisar seus efeitos no comportamento da compressão e de abatimento do concreto. Alguns dos estudos abordados nos últimos anos foram realizados em materiais em escala nanométrica que quando incorporados geram produtos e, muitas vezes mais leves e menor custo de produção e um desses materiais em escala nano é a nanopartícula de óxido de alumínio (NP-Al), produzida a partir do LAA que será utilizada neste trabalho, na qual foi sintetizada através do processo de precipitação em meio aquoso e obtido nanopartícula de hidróxido de alumínio. Nesse sentido, a partir do conhecimento do LAA visando sua reutilização, este trabalho enfatiza o seu uso no concreto e sua influência e eficácia na compressão, deste modo foi realizado uma secagem deste lodo e desaglomerando as partículas para ser feito a calcinação da NP-Al material este que foi produzido a partir do lodo de anodização de alumínio e também foi realizado a calcinação do próprio LAA para ser incorporado na formulação do concreto substituindo o cimento CP-IV 32 em uma quantidade definida em 2%, para realizar esta incorporação foram moldados corpos de prova para serem rompidos com idades de 7 e 28 dias. A comparação se deu com os corpos de prova moldados em diferentes composições, no qual foi utilizado um traço referência e com base nesse traço referência foi implementado 2% de NP-Al e 2% do LAA substituídos na quantidade de cimento determinado no traço referência, foram moldados somando todos os ensaios, 12 corpos de prova com dimensões de 200 mm x 100 mm. Os resultados dos ensaios de compressão uniaxial e de abatimento do concreto para a idade de 7 dias e 28 dias foram maiores quando se utilizou 2% de NP-Al quando comparados com a adição de 2% do LAA, além disso, ambas as amostras tiveram resultados inferiores quando comparados ao concreto referência.

Palavras-chave: Lodo de anodização de alumínio. Cimento CP-IV 32. Nanopartícula de óxido de alumínio.

ABSTRACT

The aluminum anodizing process produces a large volume of sludge that even being classified as an inert waste has the need to be disposed of in controlled landfills. Due to the enormous amount of sludge generated, transportation and appropriate disposal generate additional costs to companies. Probably, this sludge provides characteristics that can make it used in several industrial processes as a raw material, because it presents a high presence of alumina in its composition, after undergoing a calcination process that changes the characteristics of the composition by eliminating salts and alkaline hydroxides, which are contaminants when inserted in certain types of materials. Still, this material is most of the times only discarded in landfills leading to a huge waste of alternative raw material and potentially a huge pollution to the environment. Taking into account this power of reuse of aluminum anodizing sludge (AAL), this paper aims to investigate the effect of incorporating 2% of aluminum oxide nanoparticles and aluminum anodizing sludge in concrete to analyze its effects on the behavior of compression and slump of concrete. Some of the studies addressed in recent years were conducted on nanoscale materials that when incorporated generate products and often lighter and lower cost of production and one of these nanoscale materials is the aluminum oxide nanoparticle (NP-Al), produced from the LAA that will be used in this work, which was synthesized through the process of precipitation in aqueous media and obtained aluminum hydroxide nanoparticle. In this sense, from the knowledge of LAA aiming its reuse, this work emphasizes its use in concrete and its influence and effectiveness in compression, In this way a drying of this sludge was performed and disagglomerating the particles to be made the calcination of the NP-Al material that was produced from the sludge of aluminum anodizing and was also performed the calcination of the LAA itself to be incorporated into the formulation of concrete replacing the cement CP IV 32 in an amount set at 2%, to perform this incorporation were molded test bodies to be broken with ages of 7 and 28 days. The comparison was made with the molded specimens in different compositions, in which a reference mixture was used and based on this reference mixture 2% of NP-Al and 2% of LAA was implemented, substituted in the amount of cement determined in the reference mixture, 12 specimens with dimensions of 200 mm x 100 mm were molded adding all the tests. The results of uniaxial compression and slump tests for the age of 7 days and 28 days were higher when using 2% of NP-Al when compared to the addition of 2% of LAA, in addition, both samples had lower results when compared to the reference concrete.

Keywords: Aluminum anodising sludge. Cement CP-IV 32. Nano particle aluminum oxide.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma referente a sequência dos processos de anodização.....	24
Figura 2 – Início do processo de anodização.....	25
Figura 3 – Etapa do banho de neutralização	26
Figura 4 – Fosqueamento etapa que mais contribui para a geração do lodo.....	27
Figura 5 – Fluxograma do esquema do processo de tratamento de efluentes no processo de anodização.....	28
Figura 6 – Comparação de escala de tamanho de diversos organismos e estruturas com nanopartículas	32
Figura 7 – Micrografias obtidas em MET 100 nm da: (a) LAA; (b) nanopartícula de hidróxido de alumínio; (c) LAA calcinado e (d) NP-Al calcinada	36
Figura 8 – Processo via - seca de fabricação de cimento Portland.....	38
Figura 9 – Transformações de fase na farinha industrial para a produção de clínquer em um sistema de forno com pré aquecedor e pré calcinador.....	39
Figura 10 – Teores dos composições principais do cimento Portland.....	39
Figura 11 – Diagrama triaxial CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ com a localização composicional das diferentes adições utilizadas no cimento Portland.....	40
Figura 12 - Microscopia de luz do clínquer.....	41
Figura 13 - Ilustração simplificada do processo de dissolução e precipitação no início do processo de hidratação do cimento.....	43
Figura 14 - Composição dos cimentos Portland de alto-forno e pozolânico.....	46
Figura 15 - Principais etapas da pesquisa.....	48
Figura 16 – Sequência que mostra o Lodo desde o recebimento, após o período de secagem na estufa e macerado.....	49
Figura 17 – Etapas da síntese para obtenção das nanopartículas de hidróxido de alumínio (a) lixívia ácida; (b) filtração; (c) produção do aluminato de sódio; (d) obtenção da nanopartícula de hidróxido de alumínio; (e) nanopartícula de hidróxido de alumínio após a secagem.....	50
Figura 18 – Materiais utilizados para moldagem dos corpos de prova.....	52
Figura 19 – Moldagem dos corpos de prova.....	53
Figura 20 – Ensaio de abatimento do concreto utilizando o método do tronco de cone.....	55
Figura 21 – Máquina de ensaio à compressão modelo: PCE – 150 – D.....	56
Figura 22 – Ruptura dos corpos de prova através do ensaio de compressão uniaxial.....	60
Figura 23 – Corpo de prova com adição de NP-Al após a ruptura.....	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultados teste compressão uniaxial	62
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de materiais para moldagem dos corpos de prova do concreto referência.....	52
Tabela 2 – Quantidade de materiais para moldagem dos corpos de prova do concreto com 2% de lodo de anodização de alumínio.....	54
Tabela 3 – Quantidade de materiais para moldagem dos corpos de prova do concreto com 2% de nanopartículas de óxido de alumínio.....	54
Tabela 4 – Perda de massa após a calcinação do NP-Al e LAA	58
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de abatimento do concreto.....	59
Tabela 6 – Ruptura dos corpos de prova com idade de 7 e 28 dias através do ensaio de compressão uniaxial.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABCP	Associação Brasileira do cimento Portland
Al	Alumínio
ETE	Estação de tratamento de efluentes
LAA	Lodo de anodização de alumínio
MEG	Metiletilglicol
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MJ	Megajoule
NP-Al	Nanopartícula de alumínio
PEG	Polietileno glicol
PMA	Polimetacrilato
PVA	Acetato de Polivinila

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	24
Equação 2	24
Equação 3	34
Equação 4	40
Equação 5	44
Equação 6	44
Equação 7	44
Equação 8	45
Equação 9	45
Equação 10	45
Equação 11	50
Equação 12	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	JUSTIFICATIVA	19
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo geral	21
1.2.2	Objetivos específicos	22
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1	LODO DA ANODIZAÇÃO DE ALUMÍNIO	23
2.1.1	Aplicações e potencial econômico do LAA.....	30
2.2	NANOPARTÍCULA DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO OBTIDA A PARTIR DO LAA.....	31
2.3	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....	36
2.3.1	Fabricação.....	37
2.3.2	Composição química do cimento Portland	39
2.3.3	Hidratação do cimento.....	42
2.3.4	Cimento CP-IV 32 ou cimento Portland pozolânico	45
3	METODOLOGIA.....	47
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	47
3.1.1	Sintetizando Nanopartícula de Hidróxido de Alumínio (NP-Al).....	49
3.1.2	Tratamento Térmico do LAA e NP-Al.....	51
3.1.3	Processamento dos corpos de prova	51
3.1.4	Processamento dos corpos de prova do concreto com adição de 2% de LAA.....	53
3.1.5	Processamento dos corpos de prova do concreto com adição 2% de NP-Al	54
3.1.6	Ensaio de abatimento do concreto	54
3.1.7	Ensaio de resistência à Compressão uniaxial	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.1	LAA E AS NANOPARTÍCULAS DE HIDRÓXIDO E ÓXIDO DE ALUMÍNIO.....	57
4.2	CONVERTENDO O LAA E A NANOPARTÍCULA DE HIDRÓXIDO DE ALUMÍNIO EM ÓXIDO DE ALUMÍNIO.....	57
4.3	DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA PELO ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE	58
4.4	RESISTÊNCIA Á COMPRESSÃO UNIAXAL	59

4.4.1 Resistência à compressão uniaxial dos corpos de prova analisados	60
5 CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE APROFUNDAMENTO	64
REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Um grande desafio para a economia mundial e para o meio ambiente é conciliar o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental. Para resolver esse impasse métodos que visam a sustentabilidade estão sendo implementados em indústrias de pequeno, médio e grande porte. De acordo com Royal Society Of Arts (2013), 90% das matérias-primas utilizadas na fabricação de produtos duráveis tornem-se resíduos antes mesmo do produto sair da fábrica, e aproximadamente 80% do que é produzido é descartado nos primeiros seis meses de uso.

Percebe-se que os resíduos sempre fizeram parte das indústrias e na vida das pessoas, porém, com um aumento exponencial da população e, conseqüentemente, dos processos industriais para atender a todas as necessidades, esses resíduos sólidos tiveram um aumento maior do que se podia absorver, sendo que, nem todos serão reutilizados ou reciclados ou realizado um destino ambientalmente correto. As atividades industriais são responsáveis pela grande maioria dos impactos ambientais e descarte incorreto de resíduos, diante desta situação, os órgãos ambientais têm demonstrado grande preocupação com a quantidade de resíduos sólidos gerados pelas indústrias bem como sua destinação. Muitos destes resíduos são descartados em aterros sanitários e ficam neste local por longos anos, pois não existe um processo de reaproveitamento ou o resíduo não é reciclado, porém, muitos destes subprodutos podem ser reciclados ou reutilizados em outro processo.

Desta forma, pesquisas que visam a preservação do meio ambiente estão sendo realizadas visando a obtenção de novas tecnologias que permitam o uso racional e seguro dos recursos naturais, utilizando menores gastos energéticos, diminuindo a emissão de gases tóxicos e de certa forma, diminuindo a necessidade da obtenção de matérias-primas a serem extraídas da natureza. Em paralelo, novas tecnologias estão sendo criadas para aumentar a produção e lucros de empresas, através de descobertas visando para a fabricação de novos produtos a partir de resíduos. Dentre os mais variados tipos de resíduos sólidos, existe o lodo de anodização de alumínio (LAA), que segundo Gomes (2005, p.21), “[...] em função da sua natureza complexa e dificuldade de manuseio, estas lamas não tiveram nenhuma aplicação relevante durante anos, sendo destino final a deposição em aterros sanitários[...]”.

O LAA, como o próprio nome já diz, é gerado através do processo de anodização do alumínio, procedimento este que gera um alto consumo de água, assim como produz uma significativa quantidade de resíduo sólido, que após o processo de anodização são depositados em aterros sanitários pois não apresenta grandes perigos, porém, o mesmo é composto por

materiais pesados podendo trazer riscos à saúde humana e ao meio ambiente, se não forem destinados de forma correta. Segundo a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2017), a produção brasileira de alumínio primário no ano de 2016 foi de, aproximadamente, 772,2 mil toneladas, porém, de acordo com a associação, não existem dados específicos sobre a quantidade de alumínio anodizado no país. O LAA mesmo sendo rico em alumínio (Al) e ser extremamente importante ao ser utilizado como matéria-prima em diversas aplicações industriais, ainda é ignorado tanto no Brasil como em outros países, devido a alguns fatores que vão desde a sua localização ao alto custo de tratamento. Vale destacar que, empresas de todos os ramos vem recebendo incentivos para realizarem pesquisas, visando descobrir novas formas de aplicações ou qualificar parâmetros de pesquisas que já utilizaram este lodo, pois novas descobertas trariam benefícios ao meio ambiente e conseqüentemente para as próprias empresas no que diz respeito a otimizar lucros e, posteriormente o LAA não seria mais depositado em enormes quantidades em aterros sanitários.

Com o avanço da tecnologia, existem em andamento diversas pesquisas que visam descobrir e aprimorar materiais em escala nanométrica. Estes materiais, em tamanho nanométrico, estão sendo desenvolvidos com os mais variados tipos de estruturas, sendo eles, nanocompósitos, nanotubos, nanofios e nanobastões (SILVA, 2009). Denigres Filho (2016), diz que uma das áreas mais atraente e promissora das Engenharias se dá aos materiais nano estruturados, porque na maioria das vezes esses materiais mostram diferentes propriedades com relação aos materiais em escala macro. Nano estruturas podem levar o material a ficar mais leve, resistente e com uma redução de custo para sua manutenção ao longo da sua vida útil (DENIGRES FILHO, 2016).

Devido ao aumento da demanda de novos materiais a serem utilizados na construção civil, a utilização tanto do lodo de anodização de alumínio, quanto a implementação de novas pesquisas de nanomateriais, se faz extremamente importante para diminuir a dependência de recursos naturais, além de evitar o descarte destes resíduos em aterros sanitários.

1.1 JUSTIFICATIVA

A partir de meados do século XVIII, com o início do surgimento da onda industrial, com a expansão de indústrias e nações impulsionou um enorme crescimento na economia e consequentemente produções aumentaram em um curto e médio prazo de tempo, porém as matérias-primas eram escassas e limitadas e teve a necessidade da criação de um modelo que criasse novos processos produtivos e com isso trouxe junto enormes problemas sociais e ambientais entre eles os resíduos (TOFFLER, 1993).

O interesse no desenvolvimento de produtos e econômico fizeram com que o ser humano explorasse praticamente todos os recursos naturais disponíveis e gerasse enormes quantidades de resíduos poluentes. Porém o reflexo na natureza e o impacto ambiental já existe a muito tempo e mirando a diminuição desses impactos, indústrias estão desenvolvendo novas tecnologias que permitam a diminuição da extração de matéria-prima e baratear os processos produtivos e, consequentemente com essas novas tecnologias diminuir a quantidade de resíduos produzidos.

Com a intenção de diminuir o impacto ambiental e os custos com logística para dar um destino adequado a estes resíduos provenientes do processo, novas técnicas e modelos estão sendo utilizadas na descoberta e produção de novos produtos que utilizem resíduo como matéria-prima, materiais que em um passado não muito distante eram classificados como poluentes e hoje a sociedade analisa com um potencial ativo para geração de renda e empregos, pois possui um alto valor agregado, sendo assim essas pesquisas trariam benefícios para o meio ambiente e para as pessoas (GOMES *et al.*, 2003).

Um dos resíduos que ainda precisa ser estudado e descoberto seja no Brasil ou em outros países é o lodo resultante do processo de anodização de alumínio, a reciclagem deste material se tornou interessante porque o mesmo apresenta após ser calcinado um alto percentual de alumina, matéria-prima muito utilizada em vários seguimentos da indústria (SARTOR, 2006).

A necessidade de novas pesquisas e métodos que visam a preservação ambiental e socioeconômica, busca aperfeiçoar também o cimento Portland, assim como reutilizar o lodo de anodização de alumínio. Percebe-se através da literatura que, este lodo tem sido pouco utilizado e estudado no Brasil, sobretudo no desenvolvimento de novos produtos em escala industrial.

Para Gomes (2005), a utilização do lodo de anodização é justificada por razões tecnológica, econômica e ambiental. No que diz a tecnologia está o fato deste material

apresentar características que possibilitam descobertas de novos produtos. Na razão econômica ressalta-se que o descarte e tratamento destes resíduos tem um custo elevado gerando um prejuízo alto para as empresas, entretanto, investir no desenvolvimento de novos produtos a partir deste material pode significar inovação e diminuição de custos e, potencialmente elevar os lucros com a venda de um produto com valor agregado produzido a partir do LAA. A razão ambiental seria a diminuição da extração dos recursos naturais e evitaria o depósito em aterros sanitários.

Algumas pesquisas ao longo dos últimos anos estão surgindo na literatura como por exemplo, Costa (2013) utilizou o lodo de anodização de alumínio na produção de cimento sulfoaluminato de cálcio belítico, ou ainda Gomes (2005), que sintetizou pigmento cerâmico com as estruturas de mulita e alumina obtidas a partir de lodo de anodização de alumínio. Silva (2019), obteve nanopartícula de hidróxido de alumínio e óxido de alumínio a partir do LAA para aplicação em agente antichama em materiais poliméricos. Outras aplicações do lodo foram descobertas por Pereira (2006), que utilizou o lodo como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentícias. E Moraes (2010) que produziu e caracterizou espumas cerâmicas obtidas a partir de lodo de anodização de alumínio, sendo que o LAA também foi utilizado para a formulação de um novo pigmento inorgânico azul (LEITE, 2008). Os trabalhos encontrados na literatura mostram a ampla possibilidade do reaproveitamento deste material.

Com base no que foi exposto, nota-se que o LAA foi utilizado de várias formas, porém, são raros na literatura os trabalhos que obtiveram nanopartícula de óxido ou hidróxido de alumínio a partir deste material. Um dos trabalhos encontrados na literatura foi desenvolvido por Silva (2019, p.22), que mostrou ser “[...] possível obter esse composto em escala nanométrica pelo processo de precipitação utilizando o LAA como precursor de nanopartícula de hidróxido e óxido de alumínio [...]”.

De acordo com Muzenski (2019), nanomateriais são excelentes matérias-primas visando o desenvolvimento e desempenho dos compósitos a base de cimento, que “[...]o aumento de desempenho é alcançado pela produção de uma microestrutura mais densa e, no caso quando nanofibras são utilizadas, pode reduzir o início de rachaduras[...]” Muzenski, (2019 p.27).

Partindo destes estudos, outros resíduos derivados do alumínio já foram utilizados para a produção de nanopartícula, como por exemplo, Muzenski (2019) diz que, os nano materiais de óxido de alumínio têm o potencial para fornecer um aumento significativo na resistência à compressão de materiais à base do cimento e o mesmo utilizou alumínio óxido nano-fibras para obter compósitos a base de cimento de ultra alta resistência e chegou à

conclusão que nano fibras de óxido de alumínio a base de cimento argamassa com uma dosagem de 0,25% (em peso de materiais cimentícios) melhoram significativamente a resistência à compressão, podem fornecer até 30% de aumento na resistência à compressão de sistemas cimentícios. Foi demonstrado que mesmo em pequenas quantidades de nano fibras de óxido de alumínio em uma argamassa à base de cimento de poço de petróleo podem fornecer uma resistência à compressão de aproximadamente 200 MPa. Vipulanandan *et al.* (2018) modificou o desempenho do cimento inteligente com óxido de alumínio nano (Nano Al_2O_3), um dos resultados desta modificação foi alcançar um melhor comportamento compressivo do cimento inteligente e reduzir a piezoresistividade (altera a resistividade no pico de tensão) do material. Kouamo *et al.* (2012) utilizaram teores de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% de óxido de alumínio em geopolímeros a base de metacaulim e cinzas vulcânicas. Com a adição de Al_2O_3 no metacaulim e na cinza, na quantidade de 20% e 40% ampliou o grau de geopolimerização na resistência à compressão em 18,1% e 32,4% respectivamente.

Sendo assim, com base no exposto, o presente trabalho buscou avaliar, em escala laboratorial, o desempenho de concreto utilizando o Cimento CP-IV 32 incorporado com lodo de anodização de alumínio, de forma que se encontre uma utilização viável para esse material, também faz-se necessário novos estudos na utilização de nanopartículas obtidas através do LAA, pois este material possui alta concentração de alumina. Este trabalho de conclusão de curso foi relacionado ao estudo da incorporação de nanopartículas de óxido de alumínio NP-Al e do LAA, na formulação do concreto. Foram avaliadas, a possibilidade de incorporação do LAA e NP-Al em quantidades de 2%, e analisado o desempenho de compressão e de abatimento do concreto das amostras.

1.2 OBJETIVOS

Nos itens abaixo serão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos que serão abordados neste trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

Investigar a incorporação de nanopartículas de óxido de alumínio e lodo de anodização de alumínio no concreto para se analisar seus efeitos no comportamento da compressão e ensaio de abatimento do concreto.

1.2.2 Objetivos específicos

De modo a chegar ao objetivo global deste estudo, foram realizados os seguintes objetivos específicos:

- Sintetizar nanopartícula de hidróxido de alumínio;
- Converter nanopartícula de hidróxido de alumínio em óxido de alumínio;
- Incorporar nanopartícula de óxido de alumínio e o lodo de anodização de alumínio no concreto utilizando o cimento CP-IV 32 em quantidade de 2%;
- Analisar os resultados dos testes de compressão e de abatimento do concreto realizados nos corpos de prova para análise da viabilidade da incorporação do LAA e NP-Al.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos. O primeiro capítulo dedicado a introdução do tema. No segundo capítulo são apresentados os conceitos relacionados ao lodo de anodização de alumínio, nanopartícula de óxido de alumínio e o cimento Portland, conceitos estes que mostram o potencial ativo que o lodo de anodização tem para ser reutilizado como matéria-prima para diversas aplicações como a produção de nanopartículas de óxido de alumínio e sua utilização no concreto a base de cimento Portland que é o objetivo central desta pesquisa, para isso, fez-se uma ampla e detalhada revisão da literatura do mesmo, foram analisados aspectos econômicos, tecnológicos e ambientais e a partir disso foi possível identificar alguns dos principais desafios para a reutilização deste material e propor alternativas viáveis de aplicação e conseqüentemente gerar benefícios para as empresas que produzem tal lodo e que possuem uma enorme dificuldade em dar o destino ambientalmente correto e ao mesmo tempo ser financeiramente viável. No terceiro capítulo são demonstrados os métodos e ensaios que são abordados na realização do trabalho. No quarto capítulo encontram-se as análises e discussões dos dados que foram obtidos após a realização dos ensaios de compressão e ensaio de abatimento do concreto, juntamente com os dados interpretados através da revisão de literatura. Por fim, o quinto capítulo aborda as conclusões obtidas no presente trabalho e sugestão para aprofundamentos da pesquisa. As referências finalizam este documento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta uma abordagem sobre os temas de interesse envolvidos neste estudo, tais como os problemas ambientais que o lodo proveniente do processo de anodização do alumínio, ou seja, a matéria-prima que será utilizada na composição da nanopartícula de óxido de alumínio e do concreto a base de cimento CP-IV 32, bem como a utilização da nanopartícula de óxido de alumínio, a fim de possibilitar a interpretação do assunto sobre os temas abordados.

2.1 LODO DA ANODIZAÇÃO DE ALUMÍNIO

O alumínio é produzido em 236 plantas localizadas em 42 países nos cinco continentes, e, em 2016, a produção mundial de alumínio primário foi de 57 milhões de toneladas e cerca de 70% está localizada na China, Rússia e Canadá (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2017, p. 10). Pereira *et. al.* (2002), diz que a produção mundial anual é de 45.000 toneladas que são divididas entre Japão (39%), Estados Unidos (22%), União Europeia (22%) e outros países (17%).

O alumínio é o elemento metálico mais abundante da crosta terrestre é um metal com baixa densidade e elevada condutividade térmica e elétrica e um baixo ponto de fusão que é de 660°C e possui resistência a corrosão fina e invisível que é chamada de camada de óxido, a qual protege o metal de oxidação posteriores, essa autoproteção dá ao alumínio uma elevada resistência à corrosão. Segundo Reis (2006), a camada de óxido de alumínio tem espessura e dureza que variam, para essas aplicações é necessário desenvolver uma camada mais espessa as quais são realizados processos químicos ou eletrolíticos que é o processo de anodização.

Segundo a ABNT NBR 15329:2014, a anodização tem por finalidade promover na superfície do metal um fina camada e uniforme de óxido de alumínio, através de banhos eletrolíticos, através de agitação e temperaturas previamente controladas aumentando assim a sua resistência já que a sua superfície é um tanto quanto vulnerável, ao processo de corrosão, esse metal tem uma vulnerabilidade alta com a corrosão porque se trata de um metal extremamente reativo que após entrar em contato com a superfície atmosférica se degrada rapidamente porque não tem uma proteção natural suficiente para evitar o desgaste à corrosão.

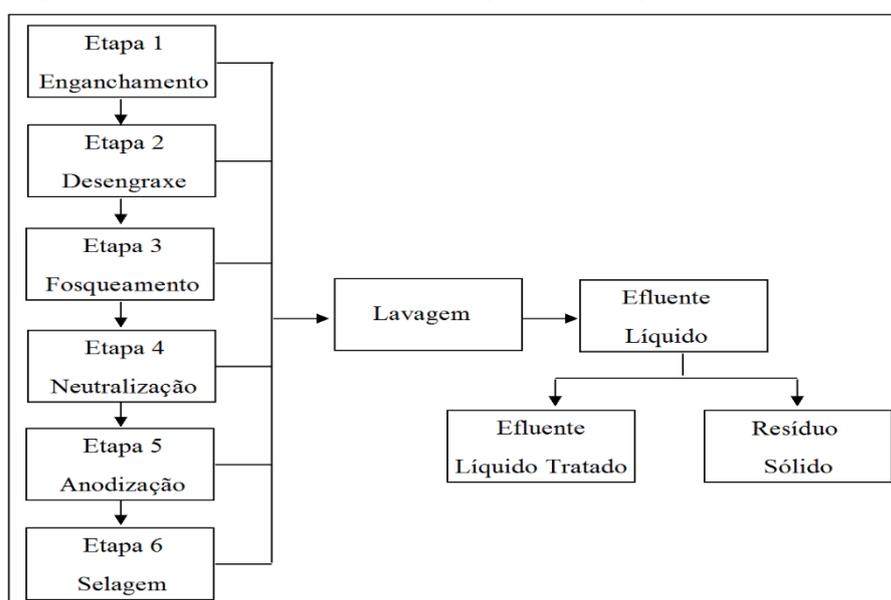
A anodização do alumínio acontece após um processo de oxidação forçada com parâmetros eletroquímicos controlados, esse processo tem como objetivo, isolar o alumínio e suas ligas de oxidantes externos e retirar irregularidades superficiais proporcionando alta

resistência à corrosão, abrasão e de isolante elétrico e intempéries (SARTOR, 2006). O filme oxidado é formado pelas reações descritas nas equações (1) e (2):



Segundo Ayuso (2009), as etapas que compõem os processos de anodização são limpeza, decapagem, anodização e selagem como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma referente a sequência dos processos de anodização



Fonte: adaptado de Grandini (2004) e Sartor (2006).

O primeiro passo do processo da anodização de alumínio é o enganchamento, que consiste em fixar as peças de alumínio nas gancheiras com um grampo, a fim de que as peças fiquem bem presas e não entrem em contatos uma com a outra. As funções do enganchamento são, segurar para que as peças fiquem presas nos momentos das trocas de tanques, ou quando estiverem submersas e manter o contato seguro para que a condução da corrente elétrica entre o retificador e a peça para obtenção de uma camada anódica uniforme. Após o enganchamento é feito o desengraxe que é a parte que tem como objetivo retirar os óleos, resíduos contaminantes, gorduras e óxidos da superfície, através da adição de solução aquosa de hidróxido de sódio e aditivo, os parâmetros de controle para a etapa de desengraxe são, temperatura, pH, tempo, concentração do aditivo. As lavagens são operações com a finalidade

de lavar e limpar as peças das etapas anteriores para que não fique os resíduos na superfície do metal, essa é uma das etapas mais importantes do processo pois é nela que se evita contaminações de um banho para outro eliminando os reagentes da etapa anterior. O fosqueamento, consiste em um tratamento químico com solução alcalina, geralmente essa solução alcalina é o NaOH que é responsável por remover a camada de óxido natural para em seguinte realizar a anodização. O tratamento químico por NaOH é um processo extremamente reativo com alumínio, aluminato de sódio e hidrogênio livre que são formados, essa etapa do processo de anodização tem como objetivo promover um aspecto fosco acetinado, tornando a superfície do alumínio homogênea, a solução química NaOH geralmente aquecida e com aditivo (opcional) para manter o alumínio dissolvido em suspensão, os parâmetros para controle do fosqueamento são, temperatura, concentração da soda cáustica, aditivo, alumínio dissolvido, tempo.

Figura 2 – Início do processo de anodização



Fonte: Gomes (2005).

O banho de neutralização tem como objetivo neutralizar os resíduos alcalinos do banho da etapa anterior, (neutralização), tal como dissolver compostos formados em decorrência das reações químicas dos elementos de liga do alumínio (manchas pretas) que são formadas sobre a superfície do alumínio se este passa um tempo excedente em contato com o ar após sair do fosqueamento. O banho de neutralização é composto por ácido sulfúrico diluído e aditivo (opcional), os parâmetros de controle do banho de neutralização são, temperatura,

concentração de ácido sulfúrico e tempo. Segundo a Associação Brasileira do Alumínio (2005), o banho nunca pode estar abaixo de 40°C, pois abaixo desta temperatura pode precipitar formando hidróxido de alumínio. A etapa mais importante é realizada em uma solução ácida. Os eletrólitos típicos são escolhidos a partir da escolha do acabamento da superfície do alumínio, são eles o ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido clorídrico, etc., (SOUZA, 2018). A anodização tem a finalidade de criar de forma acelerada e controlada uma camada anódica (5-3 um), homogênea (uniforme) e elevada dureza e resistente à corrosão e abrasão. Após esses processos de anodização de alumínio é gerado o LAA que segundo Ferreira e Olhero (2002), possui uma estrutura amorfa e constituído principalmente por hidróxido de alumínio e sulfatos de sódio e cálcio também estão presentes porém em pequenas quantidades, através da calcinação do hidróxido de alumínio é possível obter óxido de alumínio, que também pode ser chamado alumina calcinada, a mesma é utilizada na produção de concretos refratários, fibras de vidro, produção de vidros, cerâmicas, revestimentos cerâmicos, abrasivos alumina eletro fundida branca e massas de polimento (ALCOA, 2014).

Figura 3 – Etapa do banho de neutralização



Fonte: Gomes (2005).

O fosqueamento é a etapa que mais contribui para a geração do lodo (50 g/L de alumínio) em seguida vem a anodização com (15 g/L de alumínio). Porém essas quantidades variam muito de acordo com as indústrias e os processos a serem realizados. Em algumas indústrias que usam meio alcalino na etapa de fosqueamento tem como tendência o volume de lodo ser a metade da produção do alumínio anodizado, exemplo, em uma produção de 200-300

kg/t se fosse utilizado o meio ácido o volume gerado seria de 100-150 kg/t. Em muitas indústrias esses volumes também podem variar muito dependendo da eficiência do sistema de eliminação da água contida nos tanques, o uso de um sistema de eliminação de água eficiente é, atualmente, a melhor opção para cortar custos para descartar o LAA utilizando alguns métodos como filtração rotativa a vácuo e centrifugação são alguns exemplos de métodos que impulsionam a o corte de custos que estes descartes (SOUZA, 2018).

Figura 4 – Fosqueamento etapa que mais contribui para a geração do lodo



Fonte: Gomes (2005).

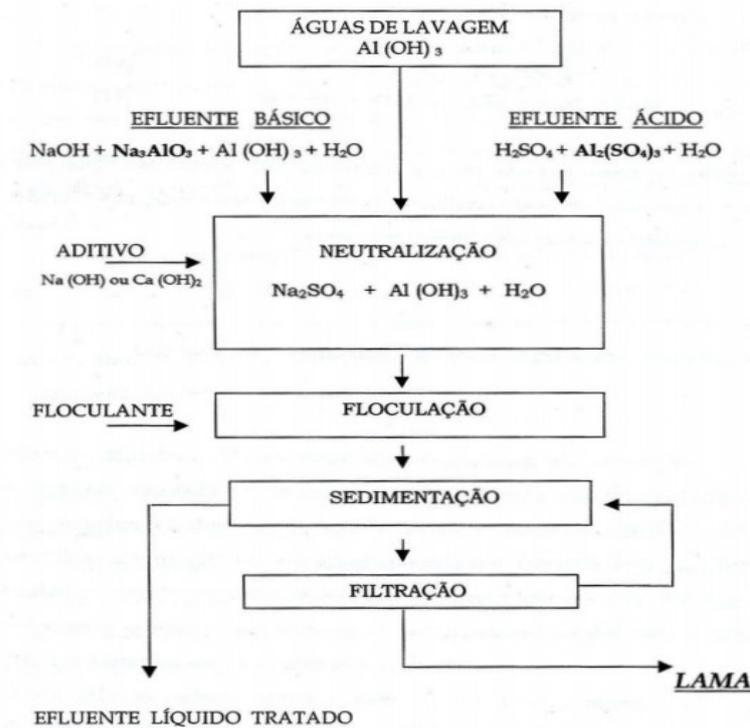
As indústrias da anodização produzem grandes quantidades de efluentes que não podem ser direcionados diretamente a uma ETE (LEITE, 2008). O processo de coloração consiste em um processo decorativo dado pelo depósito de sais de estanho no revestimento poroso, a variação de cores e tons se pela oxidação dos sais. Para essas ligas terem uma durabilidade é necessário garantir um bom processo de vedação. Ano após ano com o aumento exponencial da população e a necessidade de produzir uma maior quantidade de materiais e alumínio, as indústrias de anodização com o aumento desta produção consequentemente estão produzindo uma maior quantidade de efluentes ácidos e básicos, com destaque em especial para a etapa do fosqueamento. Estes efluentes contêm, principalmente, H_2SO_4 , $NaOH$ e Al . Alguns outros elementos como Ba , Cr , Cu , Fe , Mg , Mn , Pb , Si , Ti e Zn estão presentes, porém em quantidade pequenas, dependendo da composição das ligas anodizadas. Segundo Souza (2018) o método mais popular para se lidar com os efluentes ácidos e básicos é misturando-os (neutralização). Na neutralização, é formado o hidróxido de alumínio, que precipita - se e

decanta, dando origem a uma lama. após esse processo é adicionado sulfato de alumínio para acelerar o processo de coagulação/floculação e decantação, podendo ainda ser otimizado com a variação do pH da lama. Após isso os sedimentos vão para o processo de filtro prensagem para remoção de água. Após a secagem o LAA é enviado para o descarte em aterro sanitário.

Se tratando de exigências ambientais esse efluente é tratado através da neutralização das águas de lavagem, alcalinas e ácidas (ajuste do pH), floculação da suspensão resultante da neutralização formada por hidróxido de alumínio coloidal e separação da lama pela decantação e filtro-prensagem, com vazamento dos líquidos purificados resultantes (PEREIRA, 2006).

A Figura 5 mostra a representação esquemática de uma estação de tratamento de efluentes gerados no processo de anodização.

Figura 5 - Fluxograma do esquema do processo de tratamento de efluentes no processo de anodização



Fonte: Pereira (2006).

O processo de anodização do alumínio consome uma grande quantidade de água consequentemente gera uma grande quantidade de lodo, a uma estimativa que no Brasil a cada tonelada de material anodizado, seja gerado até uma tonelada de lodo (MORAES, 2010).

Esse lodo quando retirado do filtro prensa das instalações de tratamento de efluentes das indústrias que anodizam o alumínio geralmente tem uma cor branca e são inodoras e tem um comportamento coloidal e tixotrópico (GOMES, 2005).

O LAA é na grande maioria das vezes considerado um resíduo não tóxico, volumoso e leve, porém com uma quantidade altíssima de água (75% a 85% de umidade), misturas contendo hidroxissulfatos de alumínio e aluminatos sódicos sob forma coloidal (GOMES, 2005).

O lodo recorrente do processo da anodização do alumínio deve ser destinado, tratado e depositado de acordo com a NBR 10004:2004, que classifica os resíduos de acordo com as reações que produzem quando depositados no solo. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004), os resíduos nos estados sólido e semi sólidos, que resultam de atividades de origem industrial, ficam incluídos nesta definição, lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição. Todos os resíduos são registrados e classificados de acordo com as leis de regulamentação do país em que esse resíduo foi produzido. Os resíduos sólidos produzidos nos Estados Unidos por exemplo são gerenciados de acordo com a lei pública conhecida como Lei de Conservação e recuperação de recursos (Resource Conservation and Recovery Act – RCRA), protocolada seguindo as orientações da Agência de Proteção Ambiental (Environmental Protection Agency – EPA). O RCRA faz o monitoramento constante em especial de alguns metais pesados, que são tóxicos mesmo em pequenas quantidades, sendo estes: arsênio (5 ppm), bário (100 ppm), cádmio (1 ppm), cromo (5 ppm), chumbo (5 ppm), mercúrio (0,2 ppm), selênio (1 ppm) e prata (5 ppm) (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2012). Segundo Souza (2018) entre os elementos descritos acima, o cromo é encontrado com frequência na composição química acima permitido pela lei. Souza (2018) diz ainda que tal contaminação por cromo pode estar relacionada ao uso ácido crômico que é usado na etapa de neutralização do alumínio.

Devido à grande quantidade de resíduos que são produzidos e colocados em áreas de aterros sanitários geram custos adicionais para as empresas sendo assim estudos e pesquisas estão sendo realizadas com o intuito de realizar descobertas para aplicações destes resíduos em escala industrial (SARTOR, 2006).

Diferentes tipos de aplicações para o LAA estão sendo realizadas como por exemplo Brook (1991), que usou o lodo como cola para produção de papel, Pajunen (1999), que aproveitou o material como agente floculador no tratamento de águas residuais industriais, Ribeiro *et. al.* (2002), utilizou o lodo e obteve bons resultados no aumento da resistência elétrica

e mecânica, além da refratariedade elevada, alguns outros estudos foram realizados utilizando alumina e obtiveram resultados satisfatórios em por exemplo nos tijolos refratários (RIBEIRO *et al.* 2002; TULYAGANOV *et al.* 2002; FERREIRA E OLHERO, 2002).

2.1.1 Aplicações e potencial econômico do LAA

Ao longo do tempo estão sendo apresentados e estudados propostas para o uso do LAA como matéria prima alguma delas são por exemplo a utilização do lodo como coagulante e adsorvente, resíduos a base de Al similares ao LAA, que são produzidos em plantas que são utilizadas para à purificação de água, alguns estudos de coagulante para estações de tratamento de águas residuais municipais (ASIF *et al.*, 2016; XU *et al.*, 2016; ZAHARI; HUA; SIDEK, 2014). Nessas plantas os sais de alumínio são incorporados aos tanques de tratamento para se obter água potável Correia *et al.* (2005), analisou como promissor o uso do LAA como um coagulante para o tratamento de efluentes nessa aplicação tendo como base análises da turbidez final da água tratada e na capacidade de extrair os poluentes da porção sobrenadante.

Outra aplicação do LAA que está sendo estudado é para produção de ligantes hidráulicos e cerâmicas quimicamente ligadas, por possuir uma estrutura amorfa o LAA pode ser aplicado em sistemas reativos à temperatura ambiente, como ligantes hidráulicos. Nos dias atuais o ligante hidráulico mais usado é o cimento Portland que tem como componente em sua fabricação o calcário e argila está última possui em sua formulação sílica e alumina, sendo assim o LAA poderia ser utilizado como uma alternativa para a alumina, levando em consideração que a argila é encontrada em grandes quantidades e o LAA não, esse lodo não tem como finalidade substituir a argila e sim ser usado como um aditivo.

Na produção de materiais refratários, Tulyaganov *et al.* (2002), Raupp-Pereira *et al.* (2006a, 2006b, 2007), Ribeiro *et al.* (2002), Ribeiro; Blackburn; Labrincha (2009), Ribeiro; Labrincha (2008), realizaram estudos em que o LAA pode ser uma matéria-prima com um potencial para ser usada em formulações de materiais refratários, porque os materiais refratários à base de Al_2O_3 podem ter o LAA usado na forma de hidróxido (não calcinado), porém necessitasse de análise porque a presença de álcalis pode ser um problema para a formulação porque óxidos ou hidróxidos alcalinos são fundentes poderosos, sua presença pode limitar a temperatura de operação dos materiais cerâmicos refratários, porém antes de realizar essas análises pode-se realizar uma lavagem prévia para realizar a extração deste álcalis mantendo assim suas propriedades térmicas para uso em matérias refratários.

2.2 NANOPARTÍCULA DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO OBTIDA A PARTIR DO LAA

A demanda global por produtos do ramo da nanotecnologia vem crescendo exponencialmente nos últimos anos devido a suas propriedades e características diferenciadas, que propõem, principalmente a redução do tamanho das partículas e aumento de sua área superficial (NASROLLAHZADEH et al., 2019). Existem os mais variados tipos e formatos de materiais produzidos através da nanoescala um deles é as nanopartículas. As nanopartículas são atualmente um mecanismo que fornece aditivos que possibilita gerar novas tecnologias ou propriedades com qualidade maior que os produtos tradicionais entre os mais variados pode-se citar os produtos eletrônicos (LAH; ZUBIR; SAMYKANO, 2018), fármacos (PELTONEN, 2018), pesticidas (RANI; SHANKER; JASSAL, 2017), vestuários (MISHRA; MILITKY, 2019) entre outros. As nanopartículas metálicas podem ser obtidas através de métodos físicos ou químicos (CAO; WANG, 2011), elas são sintetizadas a partir de diferentes materiais e resultam em nanopartículas poliméricas (RAO; GECKELER, 2011), metálicas (MELO JR et al., 2012) ou de óxidos metálicos (SUBRAMANIAN et al., 2016). Como existe uma grande variedade de propriedades físico-químicas, as nanopartículas de óxido de alumínio estão entre os principais materiais nanopartículas utilizadas na indústria como catalisador, sensor, semicondutor.

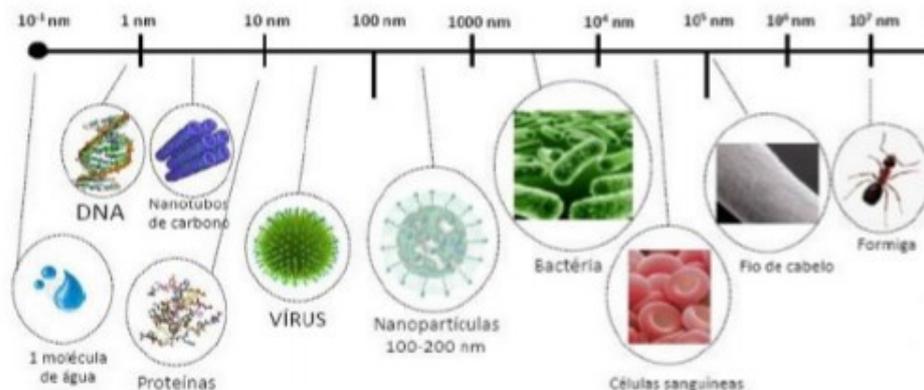
Um das nanopartículas mais usadas através dos óxidos metálicos é a de óxido de alumínio, que na maioria das vezes apresenta as mais diferentes fases cristalinas: α (alfa), β (beta), γ (gama), δ (delta), η (eta), θ (teta), κ (kappa) e χ (chi). As nanopartículas de óxido de alumínio vêm mostrando um crescimento exponencial no mercado nos últimos anos, em 2010 foi produzido 35.000 toneladas e a expectativa de produção para 2020 é de mais 100.000 toneladas (FEDERATION OF ALUMINUM CONSUMERS IN EUROPE, 2017).

Porém um dos problemas desse crescimento da utilização de nanopartículas de óxido de alumínio está no fato de que produzir grandes quantidades deste produto exige um descarte correto para elas e na maioria das vezes seu descarte é no meio ambiente trazendo prejuízos e danos para saúde e plantas (STANLEY et al., 2010; PERIASAMY; ATHINARAYANAN; ALSHATWI, 2016; SUN et al., 2016). A partir da identificação desse problema, estão sendo analisados as características físico-químicas das nanopartículas de óxido de alumínio que são de extrema importância para compreender seus efeitos tóxicos. As principais características físico-químicas que podem estar afetando o potencial toxicológico são o tamanho de partícula, estado de aglomeração, formato, estrutura cristalina, composição

química, química superficial, área superficial, carga superficial e porosidade (GATOO et al., 2014).

Além dos produtos de nanoescala produzidos pelo homem, a natureza também produz produtos em escala nano tais como uma cadeia de DNA que possui aproximadamente 2,5 nm de largura, enquanto uma molécula de água possui aproximadamente 0,25 nm de tamanho, e um átomo de ouro que possui aproximadamente 0,14 nm de diâmetro. Dados atuais demonstram que, mais de 3100 produtos comerciais que são desenvolvidos através de nanopartículas estão disponíveis em todo o mundo, a maioria desses produtos são utilizados em áreas de saúde, eletrônicos, alimentos e na área automotiva (HANSEN; MIKKELSEN; JØRGENSEN, 2020). Expectativas do mercado global da nanotecnologia mostra que se deva atingir um patamar de US\$ 3 trilhões em 2020, com uma taxa de crescimento anual composta de 25% (ROCO; MIRKIN; HERSAM, 2011; BCC RESEARCH NANOTECHONOLGY REPORT, 2016).

Figura 6 - Comparação de escala de tamanho de diversos organismos e estruturas com nanopartículas.



Fonte: Nogueira (2020).

A quantidade de nanopartícula depositadas no meio ambiente são indicadas pela diferença da produção/consumo, para se ter esses dados depende muito de como são coletados tanto na produção quanto no uso nas nanopartículas, segundo um estudo do mercado de NP-AI em 2010 estimou-se que a produção de NP-AI foi entre 18.500 – 35.000 ton/ano (NOGUEIRA, 2020). Esses números são um grande indicativo do aumento na liberação das NP-AI no meio ambiente podendo trazer efeitos negativos na biodiversidade marinha e terrestre (WANG; NOWACK, 2018a; WIGGER; NOWACK, 2019). Porém para se analisar os impactos

ambientais que a NP-Al é um desafio devido às dificuldades de compreender sobre seu transporte e destinos e dimensionar concentrações no ambiente (NOWACK, 2017). Segundo estimativas globais as emissões das nanopartículas, em geral, mostram que em torno de 60-86% dos produtos gerados com nanopartículas em sua composição tem como destino final aterros sanitários (GOTTSCHALK et al., 2009), outros estudos demonstram que em torno de 8-28% são liberados nos solos e 7% acabam no meio marinho (KELLER; LAZAREVA, 2013).

Segundo Vipulanandan *et al.* (2018), com o avanço da nanotecnologia, materiais nanoestruturados podem ser a chave para resolver alguns problemas encontrados na cimentação de poços de petróleo e gás, devido às nanopartículas possuírem tamanho extremamente pequeno.

Vipulanandan *et al.* (2018), relata que, a maioria dos estudos teve os resultados que com a adição de nanomateriais as microestruturas foram modificadas através de reações pozolânicas, essas pesquisas de incorporar nanomateriais na matriz de cimento é uma novidade e extremamente promissora. Alguns nanomateriais como nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃, nanotubos de carbono, nanofibras de carbono e nanoargila foram recentemente utilizadas em cimentos e concretos para melhorar algumas propriedades como mecânica, física, compressão e durabilidade.

Nanopartículas na maioria das vezes possuem uma eficácia maior que micro partículas, esse é um dos motivos que a utilização de nanopartículas em composições a base de cimento vem ganhando uma grande atenção nos últimos anos. Alguns dos benefícios desta utilização são; resistência, módulo de elasticidade, propriedades reológicas entre outras características, ainda assim a utilização da nanopartícula de alumínio não teve muita atenção na aplicação em composições a base de cimento, porém o uso de nanomateriais em volumes de até 7%, fornecem pouco ou nenhuma melhora na resistência à compressão e também pode reduzir a trabalhabilidade (MUZESKI, 2019).

O uso de nanomateriais se tornou ao longo dos últimos anos uma boa saída para melhorar o desempenho de produtos oriundos do cimento esses materiais fornecem uma maior durabilidade e resistência levando assim uma maior economia com manutenção e pequenos reparos, esse aumento de desempenho é alcançado pela produção de uma microestrutura densa que podem inclusive diminuir ou até mesmo evitar rachaduras (MUZENSKI, 2019).

Denigres Filho (2016), fala que uma das áreas que mais cresce na engenharia de materiais são os materiais nanoestruturados, porque esses materiais possuem propriedades diferenciadas se levar em comparação com materiais em escala macro. Nota-se que ao longo

do tempo vem surgindo tanto materiais como estudos na literatura envolvendo nanopartículas, nanocristais, nanofibras, nanotubos, nanofios e nanocompósitos.

Segundo Silva (2019), existem dois procedimentos para obter óxidos e hidróxidos de alumínio, um deles seria através de tratamento térmico que se baseia no método da calcinação controlada de $\text{Al}(\text{OH})_3$ e, o outro procedimento seria por método hidrotermal, ou seja, precipitação por meio aquoso.

Esse procedimento via meio aquoso pode ocorrer tanto por baixa ou alta temperatura, sendo que o procedimento consiste na preparação de diferentes soluções sais comerciais de Al, para se aumentar o pH do meio ou a variação de outra propriedade é necessário incorporar alguns reagentes na precipitação de hidróxido de alumínio (DELGADO, 2008).

Como existem muitos meios de obter pós precursores, se define um específico através da característica do produto final que se deseja obter. Na literatura, a palavra precipitação é utilizada afim de designar o método de preparação de pós precursores, onde uma solução de cátions é combinada com uma solução contendo o agente precipitante (SILVA, 2019; VOGEL, 1981).

Uma série de parâmetros influenciam tanto no equilíbrio químico no processo de precipitação quanto na pureza e nas propriedades físicas do material precipitado. Um desses parâmetros são devidos a concentração dos íons no processo, pH, e sequência em que é produzido o agente precipitante (SILVA, 2019).

Estudos desenvolvidos nos últimos anos por Martins et al. (2012) e Alves (2017), mostram que a obtenção de materiais em escalas nanométricas através do processo de precipitação partindo de reagentes analíticos e de solução aquosa de nitrato de alumínio e hidróxido de sódio para obter hidróxido de alumínio como mostra a equação (3):



Através de estudos das mais diversas possibilidades de obtenção de nanopartículas um dos benefícios encontrados é a criação de materiais mais leves e mais resistentes, sendo assim essa pesquisa tem como objetivo além da utilização do lodo obtido através de anodização de alumínio, a utilização da nanopartícula de óxido de alumínio para utilizar no concreto a partir da utilização do cimento CP-IV 32.

Após uma revisão na literatura foram encontradas algumas pesquisas que obtiveram nanopartículas, Silva *et al.* (2009), obtiveram nanopartículas de alumina preparadas por

precipitação que utilizaram hexahidrato de nitrato de alumínio e solução de amônia como reagentes de partida o metiletilglicol (MEG), álcool polivinílico (PVA) e polimetacrilato (PMA) como dispersantes, gerando partículas com fase de boemita que foram calcinadas a 800 °C para se transformar em alfa alumina.

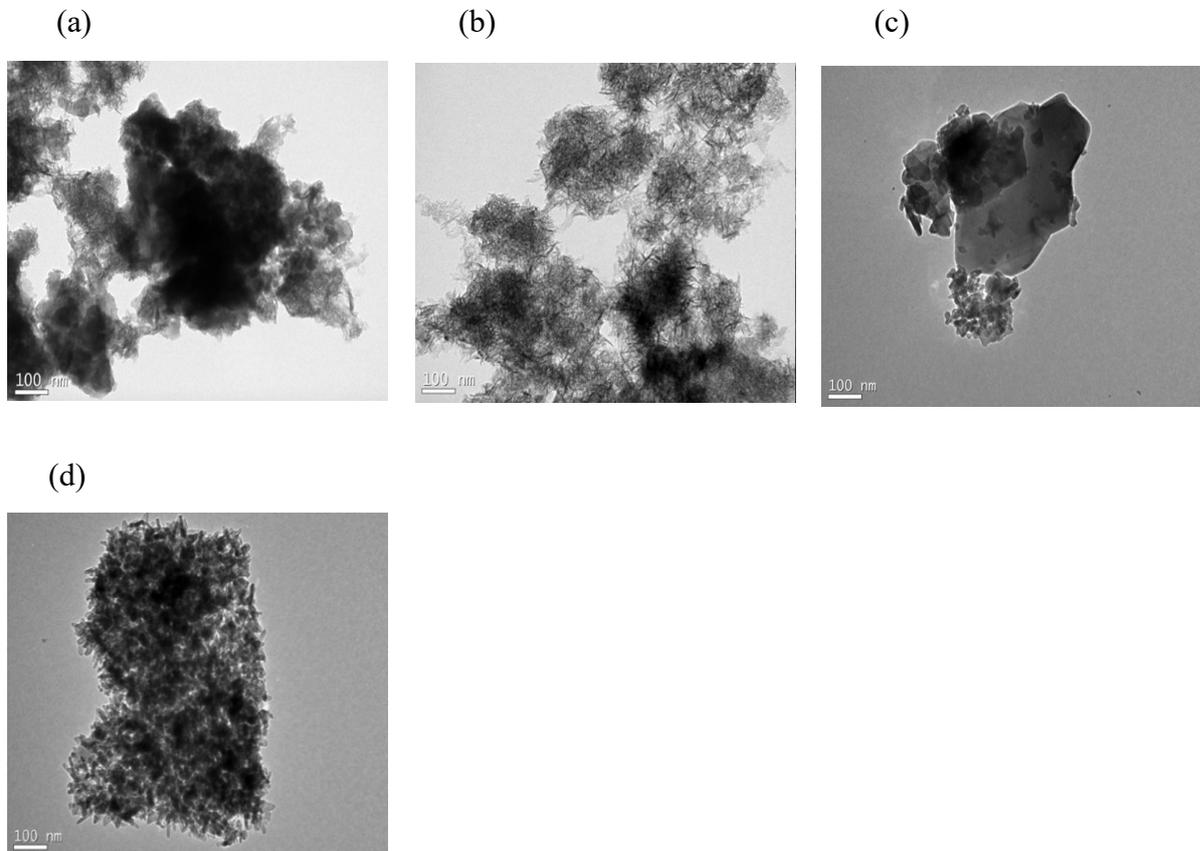
Khazaei *et al.* (2016), obtiveram partículas nanométricas de hidróxido de alumínio, as quais foram sintetizadas utilizando licor de aluminato de sódio, sendo que o uso de polietileno glicol (PEG) e acetato de polivinila (PVA) levaram à formação de partículas sólidas muito menores durante o processo de formação do precipitado, que foi calcinado posteriormente e obtida alumina.

Mahinroosta e Allahverdi (2018), sintetizou e caracterizou nanopós de alumina ativada cristalina a partir de escória de alumínio secundária usando um novo processo baseado em lixiviação e precipitação. O precipitado de óxido de alumínio foi formado como três fases cristalinas de gibsite (α -Al (OH)₃), baierita (β -Al (OH)₃) e nordestrandita (γ -Al (OH)₃) que são três polimorfos comuns do hidróxido de alumínio.

Silva (2019), sintetizou nanopartícula de óxido de alumínio a partir do lodo de anodização de alumínio para aplicação como agente antichama em materiais poliméricos.

Neste trabalho foi utilizado a nanopartícula desenvolvida por Silva (2019), seguindo sua rota de síntese de preparação das nanopartículas de hidróxido de alumínio através de precipitação em meio aquoso, e posterior calcinação, para obtenção de nanopartículas de óxido de alumínio, sendo que a mesma realizou a caracterização do LAA e das NP-Al sintetizadas e calcinadas através das técnicas de FRX, DRX e MET. Silva (2019), observou que o LAA apresentou grandes aglomerados de variados tamanhos, e que obteve materiais nanométricos da ordem de 50 nm em forma de bastões, sendo que anteriormente ao processo de calcinação, a morfologia das NP-Al era filamentada, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Micrografias obtidas em MET 100 nm da: (a) LAA; (b) nanopartícula de hidróxido de alumínio; (c) LAA calcinado e (d) NP-Al calcinada



Fonte: Silva (2019).

2.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

A palavra cimento vem do latim CAEMENTU, nome dado a uma pedra natural de rochedos e que não era esquadrejada, o cimento Portland descoberto por Aspdin que o descobriu em 1824, na ilha de britânica de Portland era somente o calcinado e não sintetizado. Atualmente, existem praticamente dois tipos de cimento produzidos no mundo: que são cimento Portland e cimento branco, porém, o cimento Portland corresponde por aproximadamente 99% de toda fabricação mundial (HÖKFORS, 2014). Em 1847, Jonhson descobriu que para obter um cimento de melhor qualidade era necessário efetuar uma queima da mistura, além da temperatura de calcinação, o uso de uma alta proporção de materiais de argila e calcários (SILVA, 1994).

A partir da descoberta de Jonhson o cimento Portland não vem sofrendo mudanças drástica na sua fabricação, apenas foi acontecendo alterações nos processos de fabricação

quanto a utilização da energia para se evitar a emissão de poluentes. A indústria responsável pela produção do cimento portland, tem como um ponto negativo a enorme quantidade de produção de gases poluentes do efeito estufa. Caijun Shi *et. al.* (2011) diz que essas indústrias estão emitindo aproximadamente 2 bilhões de toneladas de CO₂ essa quantidade corresponde a 7% de toda emissão de CO₂ no planeta. Se tais indústrias seguirem nesse ritmo, em 2025 a emissão será em torno de 3,5 bilhões de toneladas/ano.

Vale ressaltar que, o cimento nada mais é do que um pó fino com propriedades ligantes que sofre uma reação de endurecimento ao entrar em contato com a água e que após endurecido mesmo entrando em contato novamente com a água não sofre modificações.

2.3.1 Fabricação

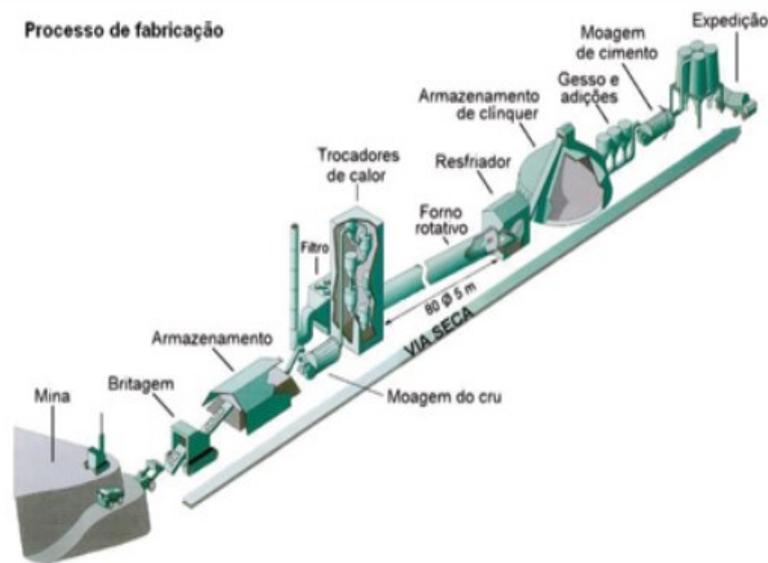
O cimento Portland é obtido a partir da mistura de porções de clínquer com outras substâncias, o gesso é o responsável pela regulação do tempo de pega, e com adições de aditivos em proporções que variam dependendo do tipo de aplicação e das características desejadas para o cimento. O cimento Portland tradicional é formado por 97% de clínquer e 3% de gesso (PAULA, L.G., 2009).

O principal componente formador do cimento Portland é o clínquer que é formado através de uma transformação térmica de alta temperatura (aproximadamente 1450°) em fornos rotativos, que se dá uma mistura pulverizada, denominada de farinha ou cru, com 80% carbonato de cálcio (CaCO₃), 15% dióxido de silício (SiO₂), 3% de trióxido de alumínio (Al₂O₃) e os 2% se encontram em outros elementos, como o ferro, o enxofre, entre outros (PAULA, L.G., 2009). Essas matérias-primas para a formação do clínquer são geralmente extraídas em pedreiras de calcário, ou margens geralmente são extraídas nas proximidades das plantas de produção de cimentos e outros constituintes minoritários contidos em areias, minério de ferro, etc...

A matéria-prima após ser misturada e moída é submetida a um processo de aquecimento que leva a produção final do clínquer. No início do aquecimento a água evapora-se junto com outros materiais voláteis. Após isso na faixa de temperatura entre 500°C a 900°C procede-se à descarbonatação do material calcário, com produção de óxido de cálcio (CaO) e liberando CO₂ gasoso. Este procedimento denomina-se na indústria cimenteira de calcinação, chegando a uma elevada temperatura entre 850°C a 1450°C acontece a reação entre o óxido de cálcio e a substância sílica – aluminosas, formando o C₄AF, C₃A, C₂S e C₃S, que constitui o clínquer.

A produção do clínquer é formado por dois processos: via úmida e via seca, nas centrais de via úmida a matéria-prima é moída ao mesmo tempo com a água e assim lançada ao forno na forma de pasta ou lama, nestes fornos, para a produção do clínquer, primeiramente é necessário evaporar a água da matéria-prima. Nos fornos de via seca não é necessário o uso da água para moer a matéria-prima, essa matéria-prima é lançada ao forno na condição de pó fino denominados farinha ou cru.

Figura 8 - Processo via - seca de fabricação de cimento Portland



Fonte: Officemen (1998).

Existem também os processos intermediários que são chamados de via semi-seca e semi-úmida. Enquanto o processo por via seca opera com forno rotativo com pré aquecedor e pré calcinado de cinco ou seis estágios pode consumir 3000 MJ de energia térmica por tonelada de clínquer produzido, já o processo por via úmida necessita de uma energia térmica de 500 MJ por tonelada de clínquer (SILVA, 1994).

Os processos por vias úmidas e semi-seca tem consumo intermediário de energia devido a sua ineficiência energética os sistemas por via úmida tem uma enorme tendência de serem abandonadas. Os fornos com pré aquecedores e pré calcinadores no Brasil são responsáveis por cerca de 99% da produção de cimento (ABCP, 2002).

O clínquer tem a saída do forno rotativo a uma temperatura acima dos 1300°C e necessita ser resfriado rapidamente para suas características químicas e cristalinas serem fixadas termodinamicamente. Esse resfriamento pode ser executado de vários equipamentos, que são chamados de resfriadores de clínquer, que fazem o resfriamento e a recuperação do

A composição potencial ou teórica do cimento Portland é estimada através da equação de BOGUE, conforme mostradas na equação (4) (MONTINI, 2009).

$$\%C_3S = 4,07. CaO - 7,60. SiO_2 - 6,72. Al_2O_3 - 1,43 Fe_2O_3 - 2,85 SO_3 \quad (4)$$

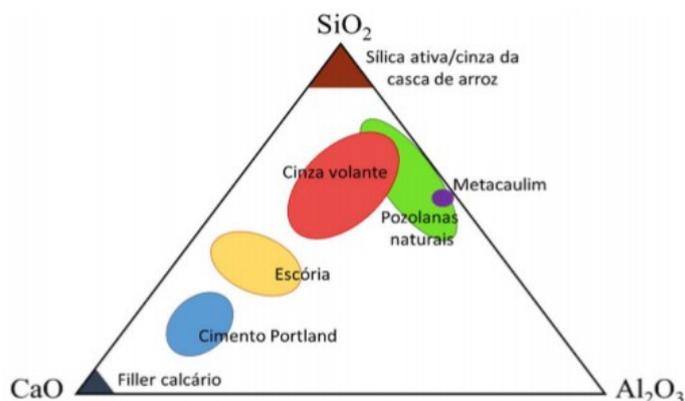
$$\%C_2S = 2,87. SiO_2 - 0,754. 3CaO.SiO_2$$

$$\%C_3A = 2,650. Al_2O_3 - 1,69. Fe_2O_3$$

$$\%C_4AF = 3,04. Fe_2O_3$$

A Figura 11 apresenta um diagrama triaxial CaO-Al₂O₃-SiO₂ com as composições aproximadas das principais adições minerais que são utilizadas nos mais diferentes tipos de cimento Portland, bem como outros materiais que são utilizados em menor escala como cinza de casca de arroz e metacaulim.

Figura 11 - Diagrama triaxial CaO-Al₂O₃-SiO₂ com a localização composicional das diferentes adições utilizadas no cimento Portland



Fonte: (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

2.3.2.1 Principais compostos do cimento Portland

- Silicato tricálcico (C₃S)

Chamado de alita, e constituído por (35 – 65% -P) do cimento Portland. Sua estrutura é cristalina e formada de tetraedros de SiO₄⁻⁴ íons oxigênio e íons cálcio e possui pequenos grãos equidimensionais. A coordenação dos íons de oxigênio em volta dos íons de cálcio é irregular de forma que sobram grandes vacâncias estruturais que produzem a alta

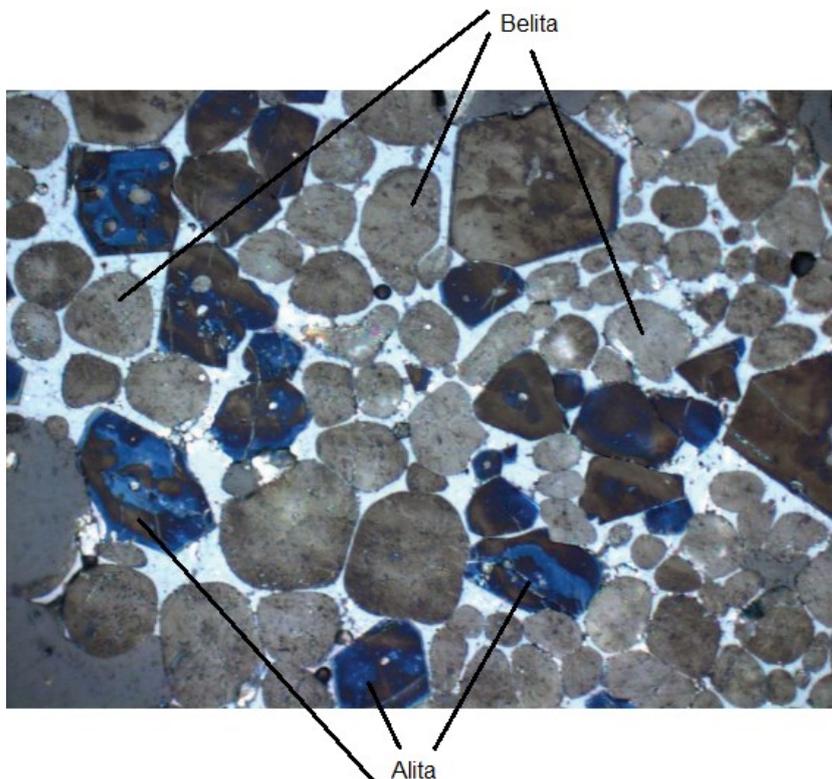
reatividade da estrutura, requisito importante para a hidratação do cimento. Já no clínquer, a alita possui óxidos como impurezas num valor de 3% a 4% (HAROLD F.W. TAYLOR, 1990).

A uma temperatura de 1450°C, o C₃S consegue se estabilizar na queima no forno rotativo, em temperaturas inferiores a tendência é de que o C₃S se decomponha para CaO e C₂S. Tenório (2003) mostrou que para se obter um clínquer com alto teor de C₃S a taxa de resfriamento do clínquer deve ser elevada.

- Silicato dicálcico Beta (C₂S – B)

A belita é responsável por 15% a 30% da massa do clínquer. A belita é o silicato dicálcico (Ca₂SiO₄), que quando é exposta com água possui uma reação lenta consequentemente tem pouca influência na resistência nos primeiros dias da cura do cimento. A belita pura é formada por 34,9% de SiO₂ e 65,1% de CaO. Segundo Neville (2016, p.10), “[...] o α-C₂S, que existe em altas temperaturas e se transforma em β-C₂S em temperaturas próximas a 1.450 °C; o β-C₂S, que se transforma em γ-C₂S em torno de 670 °C [...]”.

Figura 12 - Microscopia de luz do clínquer



Fonte: HÖKFORS (2014).

2.3.3 Hidratação do cimento

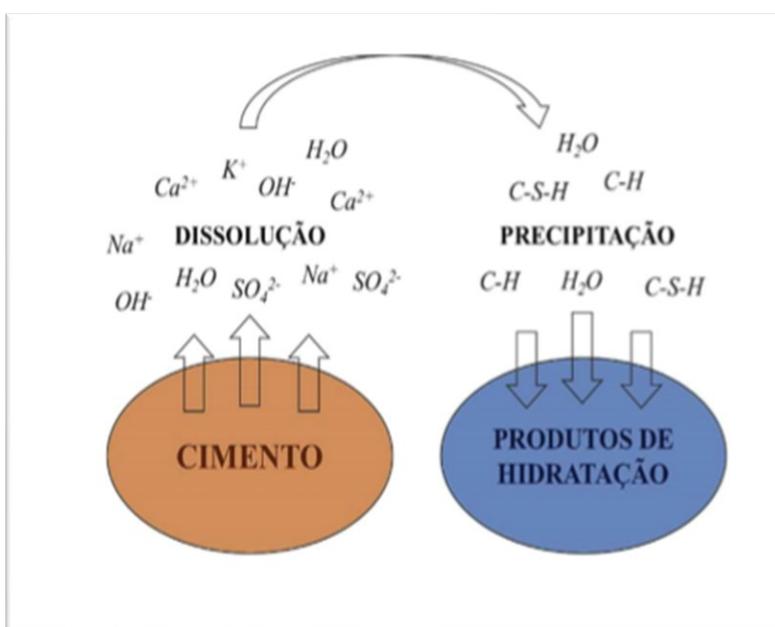
Argamassas e concretos produzidos através de cimento Portland sofrem com o problema de variação de dimensão durante seu processo de hidratação. Em alguns casos como aplicação em partes externas com uma umidade baixa pode causar uma retração do cimento hidratado e gerar tensões internas e posteriormente levar a causar fissuras o que pode danificar a estrutura, tal processo ocorre porque as tensões excedem a resistência mecânica crítica do material, o movimento de água e a perda de umidade em argamassa e concretos são um dos principais fatores que causam a retração. O responsável pela movimentação da água são as reações químicas que induzem para uma retração química e autógena, e a perda de umidade causa a retração de secagem (KHAIRALLAH, 2009). Sendo que a retração autógena e de secagem são as que mais influenciam na retração dos concretos. Dependendo das proporções da mistura a reação autógena exerce forte influência em concretos com pouca relação água/cimento e para misturas com adições de baixa superfície específica, como a escória de alto forno e a sílica ativa (HOLT, 2001b). Dependendo dos concretos, os cimentos tem grande influência, já que possuem as mais variadas composições. Quando se compara às fases C_3S e C_2S com as fases C_3A e C_4AF possuem uma influência maior na retração autógena porque os produtos de hidratação originados demandam uma quantidade maior de consumo de água (LURA; JENSEN; VAN BREUGEL, 2003; TAZAWA; MIYAZAWA; KASAI, 1995). Uma das alternativas de diminuir a retração de secagem seria utilizar menores quantidades na relação água/cimento, maior fração de agregados e pela utilização de cimentos expansivos e/ou aditivos compensadores de retração (BENTZ; GEIKER; HANSEN, 2001). Algumas ideias e métodos foram propostos para uma redução da fissuração por retração em concreto à base de cimento Portland, um desses métodos seria otimizar o processo de mistura para reduzir o teor de água e amenizar a retração de secagem só que por outro lado, a retração autógena tende a ter um aumento (HOLT, 2001a).

Outro método seria a incorporação de fibras para melhorar os mecanismos de bloqueio de trincas a base de cimento, porque mesmo em pequenos volumes as fibras podem reduzir a largura das fissuras e aumentar a resistência do material. Os mais variados tipos de fibras constitutivas foram testados, incluindo aço (PAILLERE; BUIL; SERRANO, 1989; SWAMY; STAVRIDES, 1979), polipropileno (SOROUSHIAN; MIRZA; ALHOZAIMY, 1993) e fibras naturais (SARGAPHUTI; SHAH; VINSON, 1993).

O processo de hidratação do cimento é dividido em dois processos. No primeiro, o cimento realiza a liberação de espécies iônicas na mistura aquosa que é conhecida como

dissolução, os compostos C_3S e C_3A são extremamente solúveis, o que significa que eles se dissolvem muito rápido. Em algumas vezes, as espécies iônicas aumentam suas concentrações chegando a um ponto que a solução poro fica supersaturada, a partir desse ponto é favorável que alguns dos íons se unam em fases sólidas em vez de continuarem dissolvidos. Este segundo passo do processo da hidratação é conhecido de precipitação, como mostra a Figura 13 (SOUZA, 2018).

Figura 13 – Ilustração simplificada do processo de dissolução e precipitação no início do processo de hidratação do cimento



Fonte: Souza (2018).

Na presença de água, os silicatos e aluminatos de cimento Portland se hidratam produzindo compostos hidratados que com o passar do tempo, forma uma pasta sólida e resistente, o cimento é formado por dois principais silicatos de cálcio (C_3S , C_2S) que os principais compostos cimentícios do cimento o C_3S se hidrata mais rápido do que o C_2S .

Segundo Neville (2016), existem duas maneiras dos compostos existentes no cimento podem reagir ao contato com a água. Uma delas seria a adição direta de moléculas de água, sendo a mais comum reação de hidratação. A outra forma seria da reação com água é a hidrólise.

A hidratação do cimento tem solubilidade bem baixa em água, assim como a estabilidade da pasta de cimento em contato com a água. Os produtos recém hidratados formam

um envelope que se forma pela ação da água que penetra no filme circundante de produtos hidratados. Uma alternância seria os silicatos dissolvidos passarem pelo envelope e se precipitarem como uma camada mais externa. Outra possibilidade é a precipitação de solução coloidal através de uma massa após alcançar uma determinada saturação e sua hidratação continuar a ocorrer no interior da sua estrutura (NEVILLE, 2016). Seja qual for o modo de precipitação dos produtos de hidratação, sua velocidade diminui de forma contínua, mesmo após um longo período de tempo. Após um tempo de cura de 28 dias em contato direto com água.

Os silicatos hidratados têm em suas propriedades modificadas a partir de pequenas impurezas de óxidos presentes no clínquer que tem um grande efeito na composição dos silicatos hidratados, o C_3S é chamado de alita, o C_2S é a belita. O C_3S (composto hidratado microcristalino) é responsável pela hidratação do C_3S com a liberação de cal na forma cristalina de $Ca(OH)_2$. Mesmo contendo uma quantidade menor de cal o C_2S se comporta de maneira parecida. As reações de hidratação do C_3S e C_2S respectivamente são apresentadas nas equações (5) e (6):



Os principais minerais do cimento Portland (C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF), reagem em velocidades diferentes quando são hidratados. No processo de hidratação do cimento esses compostos se dissolvem na mesma solução poro e, portanto, não estão definitivamente associados a somente um determinado mineral do cimento.

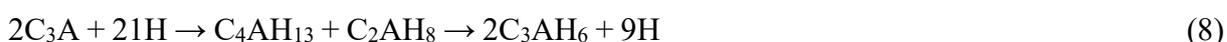
O (C_3S) que é conhecido como silicato tricálcico ou alita é o composto de maior quantidade encontrado no cimento Portland, que tem como grande contribuição na resistência mecânica inicial, a hidratação do C_3S , é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e CH é o hidróxido de cálcio, conforme mostra equação (7) (JENNINGS; THOMAS, 2009; SOUZA, 2018).



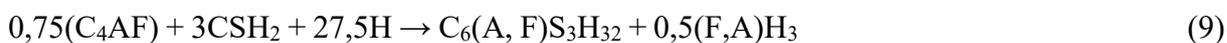
Os mesmos produtos de hidratação da fase C_2S são da fase C_3S , porém a capacidade de formar o CH na fase C_2S é bem inferior, porque a fase C_3S tem uma taxa mais solúvel que a

fase C₂S sendo assim a taxa de hidratação é maior. Mesmo a fase C₂S apresentando pouca contribuição para a resistência mecânica inicial do cimento, esta proporciona uma maior contribuição na resistência mecânica em idades mais avançadas (JENNINGS; THOMAS, 2009; SOUZA, 2018).

O C₃A tem reação de hidratação influenciada devido a presença de íons sulfatos na solução poro. A fase C₃A é extremamente solúvel, se hidratado em água pura, aluminatos de cálcio hidratados são formados, conforme mostra equação (8) (JENNINGS; THOMAS, 2009; SOUZA, 2018).



A fase ferrita (C₄AF) possui uma reação parecida à fase C₃A, porém um pouco mais lenta, as divisões transformadas de A e F variam dependendo de fatores que incluem a composição do C₄AF e as condições ambientais da pasta cimentícia. As equações (9) e (10) demonstram as reações de hidratação, nas quais A, F indicam que o alumínio predomina com a substituição variável de ferro e F, A indicam predominância de ferro com substituição variável do alumínio (JENNINGS; THOMAS, 2009; SOUZA, 2018).



2.3.4 Cimento CP-IV 32 ou cimento Portland pozolânico

O Cimento CP-IV 32 ou Cimento Portland Pozolânico tem em sua composição de 15% a 50% de material pozolânico. Por isso, proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. Possui baixo calor de hidratação, o que o torna bastante recomendável na concretagem de grandes volumes e sob temperaturas elevadas. É pouco poroso, sendo resistente à ação da água do mar e de esgotos e alguns tipos de solo (ABCP, 2002). O ataque de sulfatos ocorre através da reação do aluminato de cálcio hidratado com o sulfato proveniente do meio externo, dando origem ao sulfoaluminato de cálcio e resultando numa gradativa degradação do concreto, a norma brasileira estipula teores de no máximo 8% em massa de C₃A para esse tipo de cimento (MONTINI, 2009).

Figura 14 - Composição dos cimentos Portland de alto-forno e pozolânico

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736

Fonte: Associação Brasileira de cimento Portland (2002).

Escórias granuladas de alto-forno apresentam propriedades hidráulicas latentes e endurecem quando entram em contato com a água, as escórias tem uma reação de hidratação muito lenta o que limita sua aplicação se não haver agentes ativadores seja eles químicos e físicos, o principal componente químico que libera a hidratação do clínquer é a cal quando é adicionada ao cimento.

Os materiais pozolânicos, ao contrário das escórias granuladas de alto-forno, não reagem com a água quando são obtidos, porém quando são divididos reagem com o hidróxido de cálcio dando origem a seus compostos e propriedades aglomerantes. A adição de escória e materiais pozolânicos modifica a microestrutura do concreto, diminuindo a porosidade capilar, a difusão iônica, a permeabilidade e a durabilidade do concreto.

Esses fatores são os responsáveis por melhorar o desempenho ante a ação de sulfatos e da reação álcali-agregado. Outras propriedades também são alteradas, como a diminuição do calor de hidratação, o aumento da resistência à compressão em idades avançadas e melhora a trabalhabilidade do concreto (ABCP, 2002).

3 METODOLOGIA

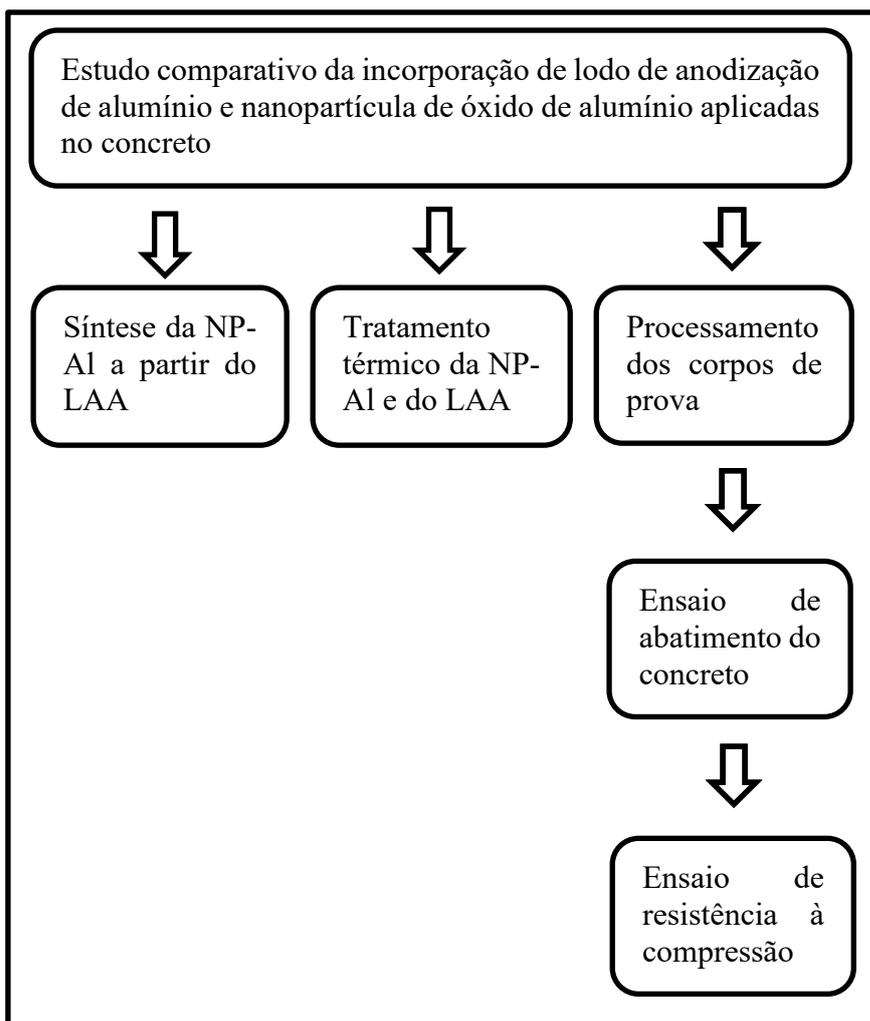
Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais e os materiais utilizados para a incorporação do lodo de anodização de alumínio e nanopartícula de óxido de alumínio (NP-Al) na formulação do concreto utilizando o cimento CP-IV 32, com o intuito de contribuir para a utilização do LAA e NP-Al, assim como responder dúvidas e lacunas existentes na bibliografia. Para alcançar os objetivos propostos serão discutidos aspectos relativos ao procedimento experimental para a avaliação do efeito das NP-Al e do LAA na resistência à compressão do concreto utilizando cimento CP-IV 32 a fim de avaliar sua eficiência.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A NP-Al foi obtida através da síntese de Silva (2019), que produziu a nanopartícula, através dos métodos baseado em trabalhos já descritos e consolidados na literatura (KHAZAEI et al., 2016; LOUAER; WANG; GUO 2013; MAHINROOSTA; ALLAHVERDI, 2018). A quantidade de NP-Al para adicionar ao cimento CP-IV 32 foi baseada em Vipulanandan *et. al.* (2018), que adicionou 1% ao cimento inteligente com uma relação água cimento de 0,38 que com esta quantidade de NanoAl₂O₃. O trabalho irá apresentar as seguintes etapas para sua realização:

- Etapa 1 – Síntese da nanopartícula de hidróxido de alumínio: nesta fase foram obtidas as NP-Al a partir do LAA através do método de precipitação;
- Etapa 2 – Tratamento térmico: nesta etapa ocorreu a calcinação do lodo de anodização de alumínio e da nanopartícula de hidróxido de alumínio para obter óxido de alumínio;
- Etapa 3 – Processamento dos corpos de prova utilizando 2% de LAA e NP-Al com relação a quantidade de cimento utilizado no traço referência além da realização dos ensaios de compressão e de abatimento do concreto.

Figura 15 – Principais etapas da pesquisa



Fonte: elaboração do autor, 2021.

Para se alcançar os objetivos propostos, a metodologia foi dividida em etapas, conforme mostra a Figura 15. Os equipamentos e reagente necessários para a realização dos procedimentos experimentais foram fornecidos pela Universidade do Sul de Santa Catarina - UNISUL no Laboratório de Solos e Laboratório de Química do Centro Tecnológico da Unisul.

O lodo de anodização de alumínio foi fornecido por uma empresa de produção de alumínio situada na Região Sul de Santa Catarina, o lodo é proveniente do tanque de fosqueamento. O LAA apresentava uma coloração branca, inodora e com uma grande quantidade de água, sendo assim a primeira etapa do processo se deu por meio da secagem do LAA, o mesmo foi colocado em uma estufa para ser previamente seco a uma temperatura de 105°C pelo período de 24 horas. Após ser retirado da estufa o lodo já apresentava uma aparência seca e com uma quantidade menor após a perda de água, o resíduo após ser retirado da estufa

foi macerado para desaglomerar as partículas até apresentar uma consistência de um pó extremamente fino, conforme Figura 16.

Figura 16 – Sequência que mostra o Lodo desde o recebimento, após o período de secagem na estufa e macerado



Fonte: elaboração do autor, 2021.

3.1.1 Sintetizando Nanopartícula de Hidróxido de Alumínio (NP-Al)

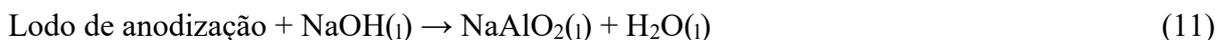
A síntese da NP-Al foi realizada através de precipitação em meio aquoso (wet chemical precipitaton), pois através deste meio se destaca a apresentação de vantagens no controle dos parâmetros utilizados no processo de obtenção de pós com partículas finas, por causa da homogeneidade química e custo reduzido de reagentes (YAMAGATA, 2004).

A primeira etapa do processo foi que após a coleta do lodo de anodização, foi colocado em uma estufa a 105° pelo período de 24 horas, após esse tempo o mesmo foi retirado da estufa e foi macerado até ficar completamente em pó e pesou-se 15 g deste lodo macerado e foi dissolvido a uma quantidade de 200 ml de água deionizada e complementado a uma pequena quantidade de ácido clorídrico (0,96 mol/L) por uma hora em um Becker de vidro. O aquecimento realizado na lixiviação foi feito através de um equipamento de banho termocriostático digital (MQBTC 99-20 Microquímica). A agitação foi realizada através de um agitador mecânico de hélice digital (IKA RW 20 CQA Química) a uma rotação de 300 rpm. Após o período de uma hora, o material que foi lixiviado foi filtrado em papel filtro Unifil.

No processo de precipitação da nanopartícula de hidróxido de alumínio, a temperatura utilizada foi de 80 °C, foi utilizado 3,3 mol/L de hidróxido de sódio, para a produção de aluminato de sódio.

Na etapa seguinte do processo o sólido que foi obtido durante a primeira etapa foi adicionado ao Becker com 200 ml de água deionizada e, com a utilização de uma bureta,

acrescentou-se o hidróxido de sódio gota por gota para produzir o aluminato de sódio, conforme descrito na Equação (11).

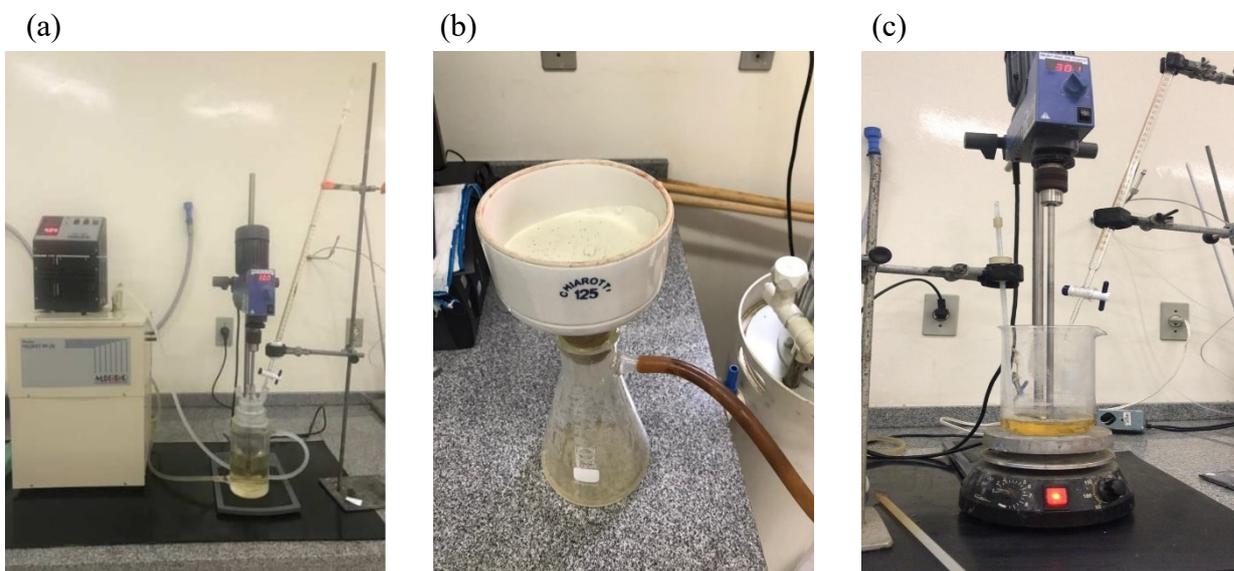


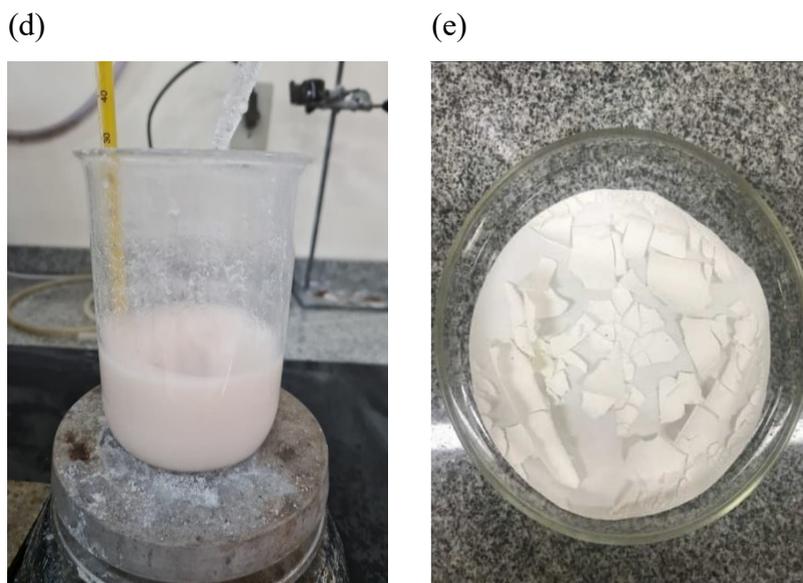
Após o período de duas horas, foi dado início a terceira etapa do processo, etapa está em que o aluminato de sódio obtido na etapa anterior foi filtrado por um papel de filtro Unifil, após isso a solução novamente foi adicionada ao Becker e então implementado o ácido clorídrico que serve como agente precipitante, com a quantidade de 1 ml/min para produzir a nanopartícula de hidróxido de alumínio, como mostra a Equação (12).



A próxima etapa do processo foi a fase sólida que foi lavada em abundância com água destilada para remover algumas impurezas existentes e o que foi obtido foi seco a uma temperatura de 100 °C pelo período de 2 horas em uma estufa. Após essa secagem em estufa, as nanopartículas de hidróxido de alumínio passaram por um processo de desaglomeração em um almofariz, todo o processo da síntese é observado na Figura 17.

Figura 17 – Etapas da síntese para obtenção das nanopartículas de hidróxido de alumínio (a) lixívia ácida; (b) filtragem; (c) produção do aluminato de sódio; (d) obtenção da nanopartícula de hidróxido de alumínio; (e) nanopartícula de hidróxido de alumínio após a secagem





Fonte: elaboração do autor, 2021.

3.1.2 Tratamento Térmico do LAA e NP-Al

O método utilizado para a calcinação do LAA e da NP-Al foi baseado em trabalhos já descritos e consolidados na literatura (AQUINO, 2007; COSTA, 2013; FLORIANO, 2014; LEITE, 2008; MARTINS, 2006; MORAES, 2010; SARTOR, 2006).

Pereira (2006), calcinou o lodo antes da utilização a uma temperatura de 1.200°C, com duas horas de patamar em uma atmosfera oxidantes (ar) e com taxa de aquecimento de 10°C/min, tal calcinação é necessária para realizar a decomposição dos sais presentes.

As amostras de NP-Al foram tratadas a temperatura de 1.200 °C para obtenção de óxido de alumínio, sendo calcinadas em forno mufla, com uma rampa de aquecimento de 10 °C/min e patamar de queima de 2 horas, realizado no Laboratório de Química do Centro Tecnológico da Unisul.

3.1.3 Processamento dos corpos de prova

Para o processamento dos corpos de prova foram dosadas 3 composições variando os teores de matérias-primas, além disso, foram moldados 4 corpos de prova sem adição nenhuma de LAA ou NP-Al, estes 4 corpos de prova serão chamados de concreto referência e seus resultados serviram de base para a análise dos resultados das demais composições. Para as demais composições também foram moldados 4 corpos de prova, 2 para a idade de 7 dias e 2

para a idade de 28 dias assim como o concreto referência, totalizando 12 corpos de prova ao final do processo.

Os primeiros corpos de prova foram moldados sem adição de LAA e NP-Al, apenas com cimento CP-IV 32. A quantidade de materiais para moldagem dos corpos de prova do concreto referência está apresentado na Tabela 1 e Figura 18.

Tabela 1- Quantidade de materiais para moldagem dos corpos de prova do concreto referência

Material	Peso (kg)
Cimento CP – IV 32	3
Areia fina do rio	5
Areia industrial	3,5
Brita 0	10
Água	1,8

Fonte: elaboração do autor, 2021.

Figura 18 – Materiais utilizados para moldagem dos corpos de prova



Fonte: elaboração do autor, 2021.

Após a mistura do concreto foi realizado o ensaio de abatimento para verificar a trabalhabilidade do concreto seguindo a NBR NM 67:1998.

Posteriormente foram moldados os corpos de prova seguindo a NBR 5738:2015, foram usados moldes cilíndricos com 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro moldados em 4

corpos de prova como mostra Figura 19. A cura dos corpos de prova foi realizada em ambiente seco.

Figura 19 – Moldagem dos corpos de prova



Fonte: elaboração do autor, 2021.

3.1.4 Processamento dos corpos de prova do concreto com adição de 2% de LAA

Após o processo de calcinação do lodo os corpos de prova com adição de LAA foram moldados a partir do mesmo traço do concreto referência já explicado no tópico 3.1.3, porém modificado na relação cimento/LAA pois nos corpos de prova foi alterado a quantidade de cimento, sendo no traço de cimento com 2% de LAA foi diminuído 2% de cimento e adicionado o lodo calcinado de anodização de alumínio como mostra a Tabela 2. A relação água cimento utilizada foi de 0,60.

Tabela 2 – Quantidade de materiais para moldagem dos corpos de prova do concreto com 2% de lodo de anodização de alumínio

Material	Peso (kg)
Cimento CP - IV 32	2,94
2% LAA	0,06
Areia fina do rio	5
Areia industrial	3,5
Brita 0	10
Água	1,8

Fonte: elaboração do autor, 2021.

3.1.5 Processamento dos corpos de prova do concreto com adição 2% de NP-Al

Após o processo de calcinação realizado, foram moldados os corpos de prova com a adição de NP-Al o traço utilizado foi o mesmo do LAA modificando apenas o LAA para NP-Al com a relação NP-Al/cimento 2% e com uma relação água/cimento de 0,60, como descrito na Tabela 3.

Tabela 3 – Quantidade de materiais para moldagem dos corpos de prova do concreto com 2% de nanopartículas de óxido de alumínio

Material	Peso (kg)
Cimento CP - IV 32	2,94
2% NP-Al	0,06
Areia fina do rio	5
Areia industrial	3,5
Brita 0	10
Água	1,8

Fonte: elaboração do autor, 2021.

3.1.6 Ensaio de abatimento do concreto

Foi realizado o ensaio de abatimento do concreto seguindo as especificações da NBR NM 67:1998, no Laboratório de Solos da Unisul, sendo que, este ensaio determina a consistência do concreto fresco através da medida de seu assentamento. O molde utilizado no ensaio tem o diâmetro da base inferior de 200 mm e diâmetro da base superior de 100 mm com uma altura de 300 mm, após o lançamento do concreto no molde foi utilizado uma haste de aço que serve para dar golpes no concreto para realizar a compactação do concreto no molde, em cada camada foram dados 25 golpes para a compactação.

Figura 20 – Ensaio de abatimento do concreto utilizando o método do tronco de cone



Fonte: elaboração do autor, 2021.

3.1.7 Ensaio de resistência à Compressão uniaxial

O ensaio de resistência à compressão uniaxial de um material tem como objetivo analisar sua resistência dos diferentes lotes analisados, o desenvolvimento da resistência à compressão depende do lote e do cimento analisado, as verificações de compressão são extremamente importantes para verificar e analisar as especificações e fazer a comparação dos tipos de cimento para determinada aplicação e controle da qualidade, em muitas vezes uma resistência inadequada compromete o desempenho parcial ou total de estruturas moldadas de concreto gerando muitas vezes a obra a ruínas.

Foram realizados os ensaios de compressão uniaxial, no Laboratório de Solos da Unisul, utilizando uma máquina de ensaio à compressão marca: EMIC, modelo: PCE – 150 – D e seguindo os parâmetros conforme a NBR 5739:2018, que mostra que para o ensaio seja realizado corretamente, é preciso primeiro nivelar o corpo de prova para que o mesmo encaixe

corretamente no centro da máquina. A máquina exercerá uma força gradual de compressão até que o corpo de prova se rompa, gerando assim o valor da compressão uniaxial.

Figura 21 – Máquina de ensaio à compressão modelo: PCE – 150 – D



Fonte: elaboração do autor, 2021.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises realizadas nos corpos de prova, bem como a discussão e fundamentação dos dados obtidos. A intenção é atender ao objetivo geral e aos objetivos específicos deste trabalho, a qual está pautado a comparação entre a incorporação de lodo de anodização de alumínio (LAA) e nanopartículas de óxido de alumínio (NP-Al) para análise dos resultados nos testes de compressão e abatimento no concreto utilizando o cimento CP-IV 32.

4.1 LAA E AS NANOPARTÍCULAS DE HIDRÓXIDO E ÓXIDO DE ALUMÍNIO

A nanopartícula de hidróxido de alumínio desenvolvida, o LAA e as nanopartículas de óxido de alumínio deveriam ter sido caracterizadas utilizando as técnicas de Fluorescência de Raio X (FRX), Difração de Raio X (DRX) e, Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET). Os resultados obtidos por essas técnicas nos ajudariam a identificar a composição química, as principais fases, a morfologia e o tamanho das partículas do LAA e das NP-Al de hidróxido e óxido de alumínio.

Verificamos que o LAA apresenta um teor de água bastante elevado, devido à presença de minerais fortemente hidratados e à presença de elementos minoritários na forma de óxido de cálcio (CaO), óxido de ferro (Fe₂O₃) e de níquel (NiO), resultado de contaminação e dos agentes químicos utilizados no tratamento das águas de lavagem (MORAES, 2010). Neste trabalho a perda de água após ser colocado na estufa a uma temperatura de 105 °C foi de 60%.

4.2 CONVERTENDO O LAA E A NANOPARTÍCULA DE HIDRÓXIDO DE ALUMÍNIO EM ÓXIDO DE ALUMÍNIO

Nesta seção serão descritos os resultados obtidos através do processo de calcinação que tem como finalidade atender ao objetivo específico que é realizar a conversão da nanopartícula de hidróxido de alumínio em nanopartícula de óxido de alumínio.

Tabela 4 – Perda de massa após a calcinação do NP-Al e LAA

Amostra	Peso (pré-calcinação) (Kg)	Peso (pós-calcinação) (Kg)	Perda (%)
LAA	0,1919	0,1284	33,09%
NP-Al	0,1956	0,1345	31,20%

Fonte: elaboração do autor, 2021.

Através dos dados da Tabela 4, é possível observar a perda ao fogo decorrente do processo de calcinação, são referentes à umidade e a perda de massa relacionada com impurezas, e moléculas de água e de elementos que constituem os minerais (CARVALHO, 2010).

Após o processo de calcinação, deveriam ter sido realizados os ensaios de FRX, DRX e MET, sobretudo para identificar o percentual de alumina presente no LAA e na NP-Al, assim como o tamanho das partículas. Estudos desenvolvidos por (AQUINO, 2007; COSTA, 2013; FLORIANO, 2014; LEITE, 2008; MARTINS, 2006; MORAES, 2010; SARTOR, 2006 e SILVA, 2019) apontam que o principal constituinte da LAA após o tratamento térmico é óxido de alumínio, sendo que os autores indicam que o aumento no percentual da alumina é devido à perda ao fogo ocorrida durante o processo de calcinação.

Silva (2019) caracterizou o LAA e a NP-Al obtidas após o processo de calcinação e foram analisadas por meio da técnica de FRX, sendo que a composição química do LAA e da NP-Al calcinadas apresentam o óxido de alumínio (Al_2O_3) como constituinte mais abundante nas duas amostras analisadas.

4.3 DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA PELO ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE

Nesta seção são descritos os resultados obtidos através do ensaio de abatimento do concreto, seguindo todas as especificações da NBR NM 67:1998, nesse teste foi analisado o abatimento do lodo de anodização de alumínio (LAA) e, da nanopartícula de óxido de alumínio, essas substituições fizeram com que o concreto ficasse com uma trabalhabilidade menor, como mostra a Tabela 5, o concreto referência com o traço utilizado mostrou um Slump de 9 cm, já a amostra com adição de 2% de nanopartícula de óxido de alumínio obteve um Slump de 7 cm e a pior trabalhabilidade foi encontrada na composição que se utilizou a adição de 2% de lodo de anodização de alumínio, com esses resultados é possível analisar que a adição das duas composições gerou uma absorção da quantidade de água gerando provavelmente uma desidratação do concreto o que pode explicar as resistências menores nos ensaios de

compressão além, de fornecer resistências menores de compressão a baixa quantidade de água no concreto podem gerar futuramente rachaduras e fissuras no concreto.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de abatimento do concreto

Amostra	Slump test (cm)
Concreto referência	9
NP-Al 2%	7
LAA 2%	5

Fonte: elaboração do autor, 2021.

4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

Nesta seção são descritos os resultados obtidos através dos ensaios de resistência à compressão, cuja finalidade é atender aos objetivos específicos de incorporar nanopartícula de óxido de alumínio e o lodo de anodização de alumínio no concreto utilizando o cimento CP-IV 32 em quantidade de 2% e, analisar os resultados dos testes de compressão realizados nos corpos de prova para análise da viabilidade da incorporação do LAA e NP-Al.

O controle da resistência à compressão de um material tem por finalidade verificar a conformidade da resistência dos diferentes lotes analisados.

Decorridos o período de cura de 7 e 28 dias foram realizados os ensaios de compressão uniaxial seguindo a NBR 5739:2018, como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Ruptura dos corpos de prova através do ensaio de compressão uniaxial



Fonte: elaboração do autor, 2021.

4.4.1 Resistência à compressão uniaxial dos corpos de prova analisados

A Tabela 6 mostra todos os dados obtidos com a ruptura dos corpos de prova com idade de 7 e 28 dias respectivamente dos corpos de prova moldados em Laboratório. Segundo a NBR 5739:2018 deve ser feito o ensaio de compressão uniaxial em dois corpos de prova e descartar o corpo de prova com o menor valor de resistência à compressão, sendo assim, para o ensaio de compressão uniaxial foi considerado o corpo de prova com o maior valor de resistência à compressão.

Tabela 6 – Ruptura dos corpos de prova com idade de 7 e 28 dias através do ensaio de compressão uniaxial

Amostra	Dias de cura	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Peso (kg)	Resistência (MPa)
Concreto referência	7	20	10	3.485	11,04
Concreto referência	7	20	10	3.495	9,66
Concreto referência	28	20	10	3.455	21,72
Concreto referência	28	20	10	3.523	20,87
Concreto 2% LAA	7	20	10	3.540	11
Concreto 2% LAA	7	20	10	3.545	10,74
Concreto 2% LAA	28	20	10	3.546	17,62
Concreto 2% LAA	28	20	10	3.575	16,42
Concreto 2% NP-Al	7	20	10	3.515	9,57
Concreto 2% NP-Al	7	20	10	3.465	9,56
Concreto 2% NP-Al	28	20	10	3.473	18,59
Concreto 2% NP-Al	28	20	10	3.543	18,14

Fonte: elaboração do autor, 2021.

Figura 23 – Corpo de prova com adição de NP-Al após a ruptura

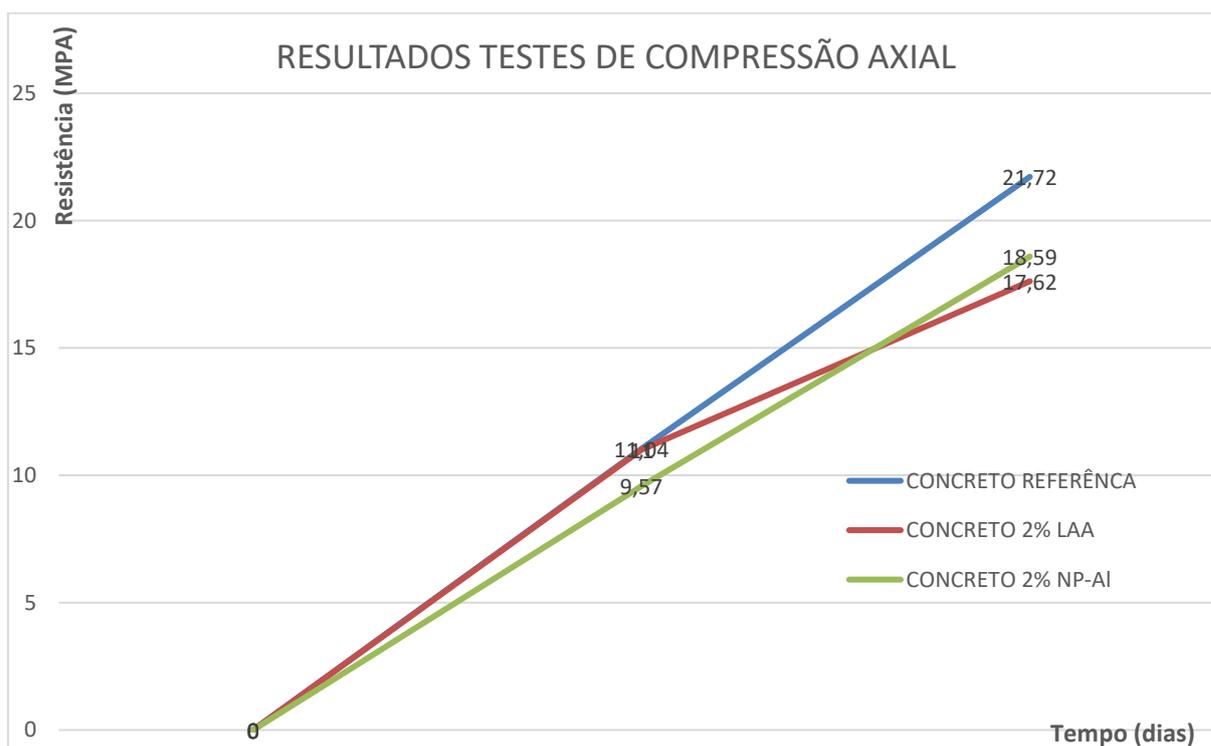


Fonte: elaboração do autor, 2021.

Após a realização dos testes de compressão com a ruptura do concreto com idade de 7 dias pode-se analisar que não teve uma diferença significativa entre os lotes analisados, sendo que a maior resistência obtida em 7 dias foi com o concreto referência 11,04 MPa, seguido do concreto com adição de 2% de LAA com resistência de 11 MPa e, a menor resistência foi obtida com o concreto com adição de 2% de NP-AI com resistência de 9,57 MPa.

A partir dos testes com idades de 28 dias pode-se analisar uma diferença considerável entre a maior resistência obtida com o concreto referência que foi de 21,72 MPa, para a maior resistência alcançada com o NP-AI 18,59 MPa, onde ocorre um decréscimo de 14,41% na resistência à compressão comparando o concreto referência. Comparando os resultados do concreto referência com a amostra de LAA, percebe-se que ocorreu um decréscimo 18,87% na resistência à compressão.

Gráfico 1 – Resultados teste compressão uniaxial



Fonte: elaboração do autor, 2021.

Segundo Souza (2018), que utilizou o lodo de anodização de alumínio com um agente expander em matrizes cimentícias, os resultados dos ensaios de compressão uniaxial foram afetados nos primeiros dias de cura do concreto devido a adição deste material na mistura do concreto porque houve um retardamento na hidratação do concreto.

Vipulanandan *et al.* (2018), utilizou uma nanopartícula de óxido de alumínio (Al_2O_3) semelhante a que foi utilizada neste trabalho e, obteve um bom comportamento melhorando inclusive a resistência à compressão e, utilizou o cimento inteligente como base.

De acordo com Muzenski (2019), grandes dosagens de nanomateriais podem se tornar menos eficazes porque esse material absorveria a água e atrasaria a hidratação e também as nanopartículas se tornariam mais aglomeradas e este grau de aglomeração as tornaria menos eficazes, portando seria possivelmente um dos motivos de uma pouca ou nenhuma melhora na resistência a compressão nos primeiros meses. No entanto, com idades superiores a 90 dias ficou claro que a curva de compressão fica ascendente tendo assim resultados satisfatórios à compressão, (MUZENSKI, 2019).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE APROFUNDAMENTO

Os resultados apresentados pela incorporação de LAA e NP-Al na composição do concreto utilizando cimento CP-IV 32 demonstraram um potencial técnico deste material para que se possa utilizar como matéria-prima na construção civil. Porém, sugere-se que aplicações que não sejam necessárias promover a calcinação ou lavagem do lodo para que se torne a utilização do mesmo mais econômico para as empresas, sendo assim, se tornando um material mais atrativo do ponto de vista econômico.

Foram realizadas 8 composições com teores de 2% de LAA e 2% NP-Al em peso com relação ao cimento. Foram alcançados valores de resistência uniaxial aos 28 dias de cura com uma variação entre 17,62 a 21,72 MPa. Também foi observado que os resultados dos testes de compressão uniaxial variam quanto o passar do tempo e com idades de cura maiores, maior será sua resistência, sendo assim, a uma tendência de que com idades de cura avançadas as resistências à compressão sejam maiores do que concretos sem adição. O LAA e a NP-Al consomem uma maior quantidade de água na hidratação podendo gerar assim uma desidratação na cura do concreto sendo assim, para a utilização do concreto com essas composições é necessário uma relação água/cimento maior. A utilização deste resíduo usando como substituto às matérias-primas naturais é viável do ponto de vista econômico, devido ao baixo custo e com uma grande quantidade disponível levando em comparação com as matérias-primas extraídas do meio ambiente.

O maior beneficiado com as aplicações dos resultados alcançados neste trabalho é o meio ambiente, considerando que a utilização do resíduo de anodização do alumínio sejam empregados na formação de novos compósitos e materiais e, assim levando a uma real possibilidade de utilização destes resíduos evitando assim o descarte em aterros sanitários evitando a contaminação e minimizando a retirada de recursos naturais devido ao reaproveitamento deste lodo.

Sugere-se estudos adicionais que podem ser realizados para a consolidação da utilização deste lodo em aplicações para que se concretize na prática, apresentados a seguir:

- ✓ É necessário realizar um estudo para análises dos custos de secagem deste material, já que a umidade contida no LAA após a retirada do processo de anodização é elevada. Sendo assim, sugere-se a precificação deste procedimento, que é importante seja qual for a aplicação;

- ✓ Se faz necessário também avaliar a utilização deste lodo em outros tipos de cimento, bem como suas mudanças que podem influenciar nos mesmos;
- ✓ Ressalta-se ainda a necessidade de realizar testes com durabilidade superior a 28 dias e analisar o comportamento que este material possa vir a ter com um longo período de tempo;
- ✓ Realização de caracterização da nanopartícula de hidróxido de alumínio desenvolvida, o LAA e as nanopartículas de óxido de alumínio utilizando as técnicas de fluorescência de Raio X (FRX), Difração de Raio X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET).
- ✓ Necessário a realização de testes sobre adição de aditivos que podem melhorar a trabalhabilidade, pois como o LAA e a NP-Al consomem uma grande quantidade de água diminui a trabalhabilidade do concreto.

REFERÊNCIAS

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Guia técnico do Alumínio: Tratamento de Superfície. 2ª Ed. São Paulo: Ed. Técnica Comunicação Industrial Ltda., 2005.

ALCOA. Principais utilidades para a Alumina. Disponível em: https://www.alcoa.com/brazil/pt/product_category.asp?cat_id=873> Acesso em: 10 mai. 2021.

ALVES, A. C. **Estudo da obtenção e caracterização de alumina α nanoparticulada via síntese química e tratamento térmico convencional**. 2017. Dissertação. (Mestrado em Engenharia e Tecnologias Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017. Disponível em: <http://mtcm21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.19.19.24/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2021.

ASIF, M. B.; MAJEED, N.; IFTEKHAR, S.; HABIB, R.; FIDA, S.; TABRAIZ, S. Chemically enhanced primary treatment of textile effluent using alum sludge and chitosan. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 16, p. 7280–7286, 2016. DOI: 10.1080/19443994.2015.1015448.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **ABNT NBR NM 67**: Concreto – Determinação consistência pelo abatimento do tronco de cone – Classificação: ABNT, 1998.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Classificação: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos. Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **ABNT NBR 15329**: Produtos de ligas de alumínio para uso estrutural na arquitetura e na construção civil - Especificação. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Alumínio brasileiro**: soluções para uma vida sustentável. São Paulo: ABAL, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**, São Paulo: ABCP, 2002.

‘AQUINO, T. F. **Beneficiamento químico da bauxita de Santa Catarina**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/90151/248438.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 mai. 2021.

AYUSO, E. A. Approaches for the treatment of waste streams of the aluminium anodising industry. **Journal of Hazardous Materials**, v. 164, p. 409–414, 2009.

BCC RESEARCH NANOTECHONLOGY REPORT. **The Maturing Nanotechnology Market: Products and Applications**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.bccresearch.com/market-research/nanotechnology-market-products-applications-report-nan03g.html>>. Acesso em: 18 abr. 2021.

BENTZ, D. P.; GEIKER, M. R.; HANSEN, K. K. Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 7, p. 1075–1085, 2001. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00519-1.

BROOK R.J. Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials, Pergamum Press, New York, 1991.

CAO, G.; WANG, Y. **Nanostructures and nanomaterials: synthesis, properties, and applications**. 2. ed. London: World Scientific, 2011.

CARVALHO, M. F. Estudo de reaproveitamento dos resíduos da indústria de anodização do alumínio para fabricação de isolantes elétricos de alta tensão. Recife: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5235/1/arquivo2258_1.pdf. Acesso em: 15 mai. 2021.

Como é feito o cimento, sua composição e nomenclatura no mercado. Cimento Mauá, 2017. Disponível em: <<https://cimentomaua.com.br/blog/cimento-como-feito-composicao-e-nomenclatura/>>. Acesso em: 25 mar. 2021.

CORREIA, A.; CHAMBINO, T.; GONÇALVES, L.; FRANCO, A.; GONÇALVES, R.; GONÇALVES, A.; LIMPO, V.; DELMAS, F.; NOGUEIRA, C.; BARTOLOMEU, F. Municipal wastewater treatment with anodizing solid waste. **Desalination**, v. 185, n. 1–3, p. 341–350, 2005. DOI: 10.1016/j.desal.2005.04.043.

COSTA, Eugênio Bastos da. **Aproveitamento do resíduo de anodização do alumínio na produção do cimento sulfoluminato de cálcio belítico**. 2013. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/86465>. Acesso em: 10 out. 2020.

DELGADO, L. G. **Obtención y caracterización de bohemita a partir de un residuo peligroso de la industria del aluminio**. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 2008. Disponível em: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/6195/1/Bohemita.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2021.

DENIGRES FILHO, R. W. N. **Síntese e evolução térmica de boemitas com diversas morfologias**. 2016. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-23082016-084343/en.php> Acesso em: 23 set. 2020.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Hazardous Waste. Part 261: Identification and listing of hazardous waste. Toxicity characteristics. **Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) Regulations**, 2012.

FEDERATION OF ALUMINUM CONSUMERS IN EUROPE. **Brazil ranks second as a net exporter of alumina.** Disponível em: <http://www.facealuminium.com/ENG/other/news.asp?id_news=10895&FA=2>. Acesso em: 10 mar. 2021.

FERREIRA J.M.F.; OLHERO S.M. Al-rich sludge treatments towards recycling. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 22, p. 2243-2249, 2002.

FLORIANO, F. J. **Valorização dos resíduos do processo de anodização do alumínio e cinza de casca de arroz por meio da obtenção de Zeólitas.** 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/128873/330264.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 mai. 2021.

GATOO, M. A. et al. Physicochemical properties of nanomaterials: implication in associated toxic manifestations. **BioMed research international**, v. 2014, p. 498420, 2014. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25165707>> . Acesso em: 01 abr. 2021.

GOMES, V. **Desenvolvimento e caracterização de pigmentos cerâmicos baseados em alumina e mulita obtidos a partir de lama de anodização de alumínio.** 2005. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/101998>. Acesso em: 15 set. 2020.

GOMES, V. et al, Aluminum rich sludge as raw material for the ceramic industry. **Interceram**, v. 52, n. 1, 2003.

GOTTSCHALK, F. et al. Modeled Environmental Concentrations of Engineered Nanomaterials (TiO₂, ZnO, Ag, CNT, Fullerenes) for Different Regions. **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 24, p. 9216–9222, 15 dez. 2009. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es9015553>>. Acesso em: 8 mai. 2021.

GRANDINI, J. A. Contramarco & Companhia. **Anobril**. V. 1, n. 11, p. 28-33, 2004. Disponível em: <http://www.anobril.com.br>. Acesso em: 10 abr. 2021.

HANSEN, S. F.; MIKKELSEN, L.; JØRGENSEN, C. **The Nanodatabase.** Disponível em: <<http://nanodb.dk/en>>. Acesso em: 24 mai. 2021.

HAROLD F.W. TAYLOR. **Cement chemistry.** London: Academic Press, 1990.

HÖKFORS, Bodil Maria Wilhelmsson. **On the phase chemistry of Portland cement clinker.** 2014. 60 f. Tese (Doutorado) - Curso de Civil Engineers, Umeå University, Estocolmo, 2014. Disponível em: [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/ADCR27-0050_offprint%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/ADCR27-0050_offprint%20(1).pdf). Acesso em: 11 nov. 2020.

HOLT, E. **Early age autogenous shrinkage of concrete.** [s.l.] VVT Publications 446, 2001a.

HOLT, E. E. E. Early age autogenous shrinkage of concrete. **VTT Publications**, n. 446, p. 197, 2001b.

JENNINGS, H. M.; THOMAS, J. J. **Materials of Cement Science Primer: The Science of Concrete.** **Infrastructure Technology Institute (ITI)**, p. 98, 2009.

KELLER, A. A.; LAZAREVA, A. Predicted Releases of Engineered Nanomaterials: From Global to Regional to Local. **Environmental Science and Technology Letters**, v. 1, n. 1, p. 65–70, 2013. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ez400106t>>. Acesso em: 25 mai. 2021.

KHAIRALLAH, R. S. Analysis of Autogenous and Drying Shrinkage of Concrete. Access, p. 154, 2009.

KHAZAEI, A.; NAZARI, S.; KARIMI, G. H.; GHADERI, E.; MANSOURI, K. H.; MORADIAN; 1 Z. BAGHERPOR 2 S. NAZARI 3. Synthesis and Characterization of γ -Alumina Porous Nanoparticles from Sodium Aluminate Liquor with Two Different Surfactants. **Int. J. Nanosci. Nanotechnol.**, v. 12, n. 4, p. 207-214, 2016. Disponível em: http://www.ijnnonline.net/article_22929_c92605328940e2eb42eba4f717184cd3.pdf Acesso em: 26 abr. 2021.

KOUAMO, H. Tchakoute *et al.* **The effect of adding alumina-oxide to metakaolin and volcanic ash on geopolymer products: A comparative study.** 2012. 10 f. Tese (Doutorado) – Curso de Chimie Inorganique, Laboratoire, Université de Yaoundé I, Faculté Des Sciences, Nancy, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061812002255>. Acesso em: 28 abr. 2021.

LAH, N. A. C.; ZUBIR, M. N. M.; SAMYKANO, M. A. Engineered Nanomaterial in Electronics and Electrical Industries. In: **Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications.** Pahang, Malaysia: Elsevier, 2018. p. 324–364.

LEITE, A. L. S. P. **Síntese de pigmentos inorgânicos azuis com base em lama de anodização de alumínio.** 2008. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008. Disponível em: <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/2256/1/2008001530.pdf>. Acesso em: 10 set. 2020.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.12.001.

LOUAER, S.; WANG, Y.; GUO, L. Fast Synthesis and Size Control of Gibbsite Nanoplatelets, Their Pseudomorphic Dehydroxylation, and Efficient Dye Adsorption. **ACS Appl. Mater. Interfaces**, v. 5, n. 19, p. 1-7, 2013. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/am402677v>. Acesso em: 20 set. 2020.

LURA, P.; JENSEN, O. M.; VAN BREUGEL, K. Autogenous shrinkage in highperformance cement paste: An evaluation of basic mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 2, p. 223–232, 2003. DOI: 10.1016/S0008- 8846(02)00890-6.

MAHINROOSTA, M.; ALLAHVERDI, A. A promising green process for synthesis of high purity activated-alumina nanopowder from secondary aluminum dross. *J. Clean Prod.*, v. 179, n. 1, p. 93-102, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618300878>. Acesso em: 15 set. 2020.

MARINGOLO, Vagner. **Clínquer co-processado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento**. 2001. 163 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo Instituto de Geociências, São Paulo, 2001. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-16022006-132935/en.php>. Acesso em: 01 out. 2020.

MARTINS, F. M. **Caracterização química e mineralógica de resíduos sólidos industriais minerais do Estado do Paraná**. 2006. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/6456/pdf>. Acesso em: 15 mar. 2021.

MARTINS, J. C.; POLLA, M. B.; MARTINELLO, K.; PIZZOLO, J. P.; DOMINGUINI, L.; FIORI, M. A. Síntese e caracterização de nanocompostos de hidróxido de magnésio e de alumínio. **Rev. Técnico Científica (IFSC)**, v. 3, n. 1, p. 277-283, 2012. Disponível em: <http://periodicos.ifsc.edu.br/index.php/rtc/article/view/722/479>. Acesso em: 27 fev. 2021.

MELO JR., M. A. et al. Preparação de nanopartículas de prata e ouro: um método simples para a introdução da nanociência em laboratório de ensino. **Química Nova**, v. 35, n. 9, p. 1872–1878, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422012000900030Ing=pt&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 21 fev. 2021.

MISHRA, R.; MILITKY, J. Nanoparticles and textile technology. In: **Nanotechnology in Textiles**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 181–217.

MONTINI, Marcelo. **Aplicações de resíduo de bauxita e cinza pesada na indústria do alumínio na fabricação de cimento portland**. 2009. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/902>. Acesso em: 04 set. 2020.

MORAES, G. G. **Produção e caracterização de espumas cerâmicas obtidas a partir de lodo de anodização de alumínio**. 2010. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422012000100026&script=sci_arttext&tlng=pt acesso em: 28 set. 2020.

MUZENSKI, Scott (ed.). Ultra-high strength cement-based composites designed with aluminum oxide nano-fibers. **Elsevier**, Nuevo León, p. 177-186, 8 jun. 2019.

NASROLLAHZADEH, M. et al. An Introduction to Nanotechnology. In: **Interface Science and Technology**. [s.l.] Elsevier B.V., 2019. 28p. 1–27.

NOGUEIRA, Diego José. **TOXICIDADE IN VITRO E IN VIVO DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO DEPENDENTE DA FASE CRISTALINA E AVALIAÇÃO DE RISCO EM ECOSISTEMAS AQUÁTICOS USANDO UMA ABORDAGEM PROBABILÍSTICA**. 2020. 170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, A Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/216475>. Acesso em: 03 jun. 2021.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 887 p.10.

NOWACK, B. Evaluation of environmental exposure models for engineered nanomaterials in a regulatory context. *NanoImpact*, v. 8, n. March, p. 38–47, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.impact.2017.06.005>>. Acesso em: 5 abr. 2021.

OFICEMEN. Combustibles alternativos em la fabricación del cemento. Madrid, 1988. 26p.

PAILLERE, A. M.; BUIL, M.; SERRANO, J. J. Effect of Fiber Addition on the Autogenous Shrinkage of Silica Fume. **ACI Materials Journal**, v. 86, n. 2, p. 139– 144, 1989.

PAJUNEN P., Chemical Recovery for Aluminum Finishers, Workshop on Cleaner Production in the Metal Finishing Industry, Taipei, Taiwan, April, 1999.

PAULA, Luiz Gonzaga de. **Análise termoeconômica do processo de produção de cimento Portland com co-processamento de misturas de resíduos**. 2009. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Ciência e Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1589/dissertacao_0034506.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 06 set. 2020.

PELTONEN, L. Practical guidelines for the characterization and quality control of pure drug nanoparticles and nano-cocrystals in the pharmaceutical industry. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 131, p. 101–115, 1 jun. 2018.

PEREIRA D.A.; COUTO D.M.; LABRINCHA J.A. Incorporation of aluminium – rich residues in refractory bricks, **Ceram. Forum** v.77 p. 21–25, 2002.

PEREIRA, F. R. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentíceas**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade de Aveiro, Portugal, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10773/4909>. Acesso em: 30 out. 2020.

PERIASAMY, V. S.; ATHINARAYANAN, J.; ALSHATWI, A. A. Aluminum oxide nanoparticles alter cell cycle progression through CCND1 and EGR1 gene expression in human mesenchymal stem cells. **Biotechnology and Applied Biochemistry**, v. 63, n. 3, p. 320–327, maio 2016. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25779086>>. Acesso em: 16 jan. 2021.

RANI, M.; SHANKER, U.; JASSAL, V. Recent strategies for removal and degradation of persistent & toxic organochlorine pesticides using nanoparticles: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 190, n. 1, p. 208–222, 1 abr. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479716310611>>. Acesso em: 22 abr. 2021.

RAO, J. P.; GECKELER, K. E. Polymer nanoparticles: Preparation techniques and size-control parameters. **Progress in Polymer Science**, v. 36, n. 7, p. 887–913, 1 jul. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670011000232>>. Acesso em: 12 mai. 2021.

RAUPP-PEREIRA, F.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A. M.; LABRINCHA, J. A. Ceramic formulations prepared with industrial wastes and natural sub-products. **Ceramics International**, v. 32, n. 2, p. 173–179, 2006a. DOI: 10.1016/j.ceramint.2005.01.014.

RAUPP-PEREIRA, F.; RIBEIRO, M. J.; SEGADÃES, A. M.; LABRINCHA, J. A. Extrusion and property characterisation of waste-based ceramic formulations. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 27, n. 5, p. 2333–2340, 2007. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.07.015.

RAUPP-PEREIRA, F.; RIBEIRO, M. J.; SEGADÃES, A. M.; LABRINCHA, J. A. Properties of Wastes-Based Extruded Ceramics Formulations. **Advances in Science and Technology**, v. 45, p. 2218–2223, 2006b. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AST.45.2218.

REIS, M. N. **Processo de produção e uso do alumínio na construção civil: contribuição à especificação técnica das esquadrias de alumínio**. 2006. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Arquitetura) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-29112010-101045/publico/Magda_Diss.pdf Acesso em: 30 out. 2020.

RIBEIRO, M. J.; BLACKBURN, S.; LABRINCHA, J. A. Single screw extrusion of mullite-based tubes containing Al-rich anodising sludge. **Ceramics International**, v. 35, n. 3, p. 1095–1101, 2009. DOI: 10.1016/j.ceramint.2008.04.024.

RIBEIRO, M. J.; LABRINCHA, J. A. Properties of sintered mullite and cordierite pressed bodies manufactured using Al-rich anodising sludge. **Ceramics International**, v. 34, n. 3, p. 593–597, 2008. DOI: 10.1016/j.ceramint.2006.12.005.

RIBEIRO M.J; TULYAGANOV D.U.; FERREIRA J.M.; LABRINCHA J.A. Recycling of Al-rich industrial sludge in refractory ceramic pressed bodies. **Ceramics International**, v.28, p.319-327, 2002.

ROCO, M. C.; MIRKIN, C. A.; HERSAM, M. C. Nanotechnology research directions for societal needs in 2020: summary of international study. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 13, n. 3, p. 897–919, 17 mar. 2011. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11051-011-0275-5>>. Acesso em: 30 mar 2021.

ROYAL SOCIETY OF ARTS, R. Investigating the role of design in the circular economy. **The Great Recovery Project. Report 01.**, 2013.

SARGAPHUTI, M.; SHAH, S. P.; VINSON, K. D. Shrinkage Cracking and Durability Characteristics of Cellulose Fiber Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, v. 90, n. 4, p. 309–318, 1993.

SARTOR, M. N. **Caracterização do resíduo de anodização do alumínio como matéria-prima para o desenvolvimento de produtos cerâmicos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/88583>. Acesso em: 14 out. 2020.

SHI, Caijun; JIMÉNES, A. Fernández. PALOMO, Angel. **New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement**. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University. 2011.

SILVA, Francielen Kuball. **Síntese da nanopartícula de hidróxido de alumínio a partir do resíduo de anodização de alumínio para aplicação como agente antichama em materiais poliméricos**. 2019. 130 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/215556>. Acesso em: 17 set. 2020.

SILVA R. A.; DINIZ, C. F.; VIANA, M. M.; ABREU, S. L.; SOUZA, T. G. F.; MOHALLEM, N. D. S. Preparation of Thin Films Using Freeze Drier Alumina. *Braz. J. Phys.*, v. 39, n. 1, p. 236-238, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/bjp/v39n1a/a19v391a.pdf>. Acesso em: 27 out. 2020.

SILVA, Rogério José da. **Análise energética de plantas de produção de cimento Portland**. 1994. 242 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994. Disponível em: http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/CAMP_e7c5da299af3618876dadd4449d48b6b. Acesso em: 24 out. 2020.

SOROUSHIAN, P.; MIRZA, F.; ALHOZAIMY, A. Plastic shrinkage cracking of polypropylene fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, v. 92, n. 5, p. 553– 560, 1993.

SOUZA, Marcelo Tramontin. **RESÍDUO DE ANODIZAÇÃO DE ALUMÍNIO COMO AGENTE EXPANSOR EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**. 2018. 159 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, A Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/206011>. Acesso em: 13 maio 2021.

STANLEY, J. K. et al. Sediment toxicity and bioaccumulation of nano and micron-sized aluminum oxide. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 29, n. 2, p. 422–429, fev. 2010. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/etc.52>>. Acesso em: 3 abr. 2021.

SUBRAMANIAN, V. et al. Sustainable nanotechnology decision support system: bridging risk management, sustainable innovation and risk governance. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 18, n. 4, p. 89, 30 abr. 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11051-016-3375-4>>. Acesso em: 15 mar. 2021

SUN, T. Y. et al. Dynamic Probabilistic Modeling of Environmental Emissions of Engineered Nanomaterials. **Environmental Science & Technology**, v. 50, n. 9, p. 4701–4711, 3 maio 2016. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25650323>>. Acesso em: 29 mar. 2021.

SWAMY, R. N.; STAVRIDES, H. Influence of fiber reinforcement on restrained shrinkage cracking. **ACI Journal Proceedings**, v. 76, n. 3, p. 443–460, 1979.

TAZAWA, E. ichi; MIYAZAWA, S.; KASAI, T. Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 2, p. 288–292, 1995. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00011-9.

TENÓRIO, J.A.S. et al. Decomposição da fase majoritária do cimento Portland-Parte I: Alita Pura. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 56, n. 2, p. 01-08, Apr./jun.2003.

TOFFLER, Alvin. **A terceira onda**. 19 ed. Rio de Janeiro: Record, 1993.p.25-30.

TULYAGANOV, D. U.; TUKHTAEV, M. E.; ESCALANTE, J. I.; RIBEIRO, M. J.; LABRINCHA, J. A. Processing of cordierite based ceramics from alkaline-earthaluminosilicate glass, kaolin, alumina and magnesite. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 22, n. 11, p. 1775–1782, 2002.

VIPULANANDAN, C. *et al.* **Smart Cement Performance Enhancement With Nano Al_2O_3 Fot Real Time Monitoring Applications Using Vipulanandan Models**. 2018. 15 f. Tese (Doutorado) – Curso de Civil Engineers, Offshore Technology Conference Head In Houston, Texas, 2018. Disponível em: <https://onepetro.org/OTCONF/proceedings-abstract/18OTC/4-18OTC/D041S056R007/179164>. Acesso em: 25 mar. 2021.

VOGEL, A. **Química analítica qualitativa**. 5 ed. São Paulo: Mestre Jou, 1981.

XU, Y.; CHEN, T.; XU, R.; HE, L.; CUI, F. Impact of recycling alum sludge on coagulation of low-turbidity source waters. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 15, p. 6732–6739, 2016. DOI: 10.1080/19443994.2015.1013504.

YAMAGATA, C. **Influência das condições de síntese por precipitação nas características da zircônia estabilizada com MgO e aplicação no sistema $ZrO_2 - MgO - Y_2O_3$** . 2004. Tese (Doutorado em Ciências da Área de Tecnologia Nuclear-Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Chieko%20Yamagata_D.pdf. Acesso em: 27 mai. 2021.

WANG, Y.; NOWACK, B. Environmental risk assessment of engineered nano- SiO_2 , nano iron oxides, nano- CeO_2 , nano- Al_2O_3 , and quantum dots. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 37, n. 5, p. 1387–1395, 2018a. Disponível em: <<https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/etc.4080>> Acesso em: 12 mar. 2021.

WIGGER, H.; NOWACK, B. Material-specific properties applied to an environmental risk assessment of engineered nanomaterials – implications on grouping and read-across concepts. **Nanotoxicology**, v. 13, n. 5, p. 1–21, fev. 2019. Disponível em:

<<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17435390.2019.1568604>>. Acesso em: 7 mar. 2021.

WOLTER, A. Influence of the Kiln system on the clinker properties. *Zement-Kalk-Gips*, Wiesbaden, v. 38, n.12, p. 327-329, Dez. 1985. (translation of n. 10/85).

ZAHARI, N. M.; HUA, C. K.; SIDEK, L. M. Influence of Contact Time on Effectiveness of Recycle Alum Sludge as Pollutant Removal. **Journal of Energy & Environment**, n. January, p. 2,3, 2014.