

Avaliação da resistência do concreto produzido com Cimento Verde a partir de rejeitos de minério

Alice Sousa Dias, Arthur Fonseca Duarte, Gabriel Pinheiro dos Santos, João Pedro Batista de Souza, Lavínia Lima Oliveira, Pedro Henrique Reis de Freitas, Tiago Araújo Machado, Vinícius Ferreira Coelho (alic_sousa@hotmail.com, arthurfduarte029@gmail.com, gabrielpinheiro1403@gmail.com, joaopedro.pl@hotmail.com, laah.lima.2011@gmail.com, pedrohenriquefreitas97@gmail.com, tiagokentaro@gmail.com, viniciuscoelho456@gmail.com)
Professora orientadora: Luana Maris Pedrosa Cruz Ercan

Resumo: O rejeito de minério é tudo aquilo que sobra quando se usa a água para separar o minério de ferro do material que tem valor comercial, sendo a parte não utilizável depositado em barragens, sendo assim, sua utilização para produção de materiais destinados à construção civil contribui para um desenvolvimento sustentável e aumenta a segurança quanto ao rompimento de barragens. Deste modo o presente estudo tem como objetivo principal investigar a viabilidade do uso dos rejeitos de minério como material para substituição do clínquer, um dos principais materiais utilizados na produção do cimento, ao mesmo tempo em que é responsável por grande parte de emissão de dióxido de carbono (CO₂), que está diretamente ligado ao aquecimento global. Foram realizados então durante o estudo ensaios que testaram e compararam ambos os concretos (Portland e Verde) com relação a sua resistência mecânica. Com tal estudo, concluiu-se que o Cimento Verde possui propriedades mecânicas superiores ao convencional, devendo ser considerada sua utilização.

Palavras-chave: Dióxido de carbono. Desenvolvimento sustentável. Barragens. Clínquer. Aquecimento global.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil tem grande importância do progressivo desenvolvimento dos centros urbanos, sendo responsável pelo gerenciamento de obras que vão de habitação a construção de centros de serviço, saúde, educação, entre outros. Esse segmento, por ser intensiva de mão de obra, possui contribuição para a geração de emprego e renda no país. Além de gerar movimentações na economia, o setor é capaz de proporcionar desenvolvimento social, com imersão de profissionais de pouca experiência, e desenvolvimento de pessoas.

Com tantos fatores positivos para a sociedade, o ramo da construção civil carrega o fato de ser um dos setores que mais impactam o meio ambiente. Segundo dados da ONU (2016), o setor representa cerca de 40% das emissões de gases de efeito estufa, relacionados à construção de novos edifícios (ROGERS, 2018). O cimento Portland, o material mais utilizado no mundo, emite grandes taxas de dióxido de carbono (CO₂) durante sua fabricação, e representa cerca de 8% das taxas de emissões totais do planeta, cerca de 2,2 bilhões de toneladas de CO₂ (ROGERS, 2018) taxas essas que podem ser maiores que a emissão de alguns países.

Esforços para encontrar soluções que visam a redução das taxas de emissão de CO₂ estão sendo discutidas em fóruns de mudanças climáticas, e países estão buscando soluções que visam novos perfis de cimento que, sejam produzidos com taxas reduzidas de CO₂, garantindo assim um equilíbrio ambiental, e qualidade de vida para as próximas gerações. Nesse contexto, a busca por uma produção sustentável, que diminua os impactos ambientais e a utilização de recursos sustentáveis, tornam-se essenciais para o futuro do setor da construção civil.

Em um cenário atual, no estado de Minas Gerais, existem inúmeras barragens de rejeitos, que são reservatórios destinados para armazenamento de resíduos não economicamente viáveis, para o setor de mineração. O seu propósito inicial foi criado para salvaguardas ambientais, ou seja, evitar o descarte irregular no meio ambiente, pois sua composição poderia degradar todo o ambiente em que seria despejado.

Porém, os acontecimentos na cidade de Mariana, em 2015 e Brumadinho em 2019, que gerou o rompimento das barragens instaladas nas cidades, levando a perda de mais de 300 vidas, centenas de desabrigados, se tornando o maior desastre ambiental causado pelo homem na história do país (BEZERRA, 2023). A restauração do local se tornou impossível e a sua biodiversidade foi perdida de forma irreversível, além de impactar economicamente os moradores da região.

Atualmente em Minas Gerais, é o estado que abriga a maior porcentagem de barragens do país, com 350 barragens ativas cerca de 40% do total brasileiro (BEZERRA, 2023). Apresentar soluções para desativação das barragens e eliminação desse método, irá garantir segurança a população próxima das cidades, e garantir a proteção do meio ambiente, e os recentes desastres ambientais por barragens de rejeitos, nos faz repensar quanto ao risco da disposição dos rejeitos.

Com tais problemas apresentados, é apresentada uma solução que abrange tanto a redução de gases poluentes na atmosfera, quanto a utilização de rejeitos produzidos nos setores de mineração. O Cimento Verde surge como uma alternativa a esse problema. Ao reutilizar rejeitos industriais que seriam descartados, o cimento verde minimiza a emissão de dióxido de carbono, (CO₂) e dá uma destinação final aos resíduos, atuando de forma eficaz para reduzir os impactos ambientais e trazendo uma abordagem sustentável na produção de cimento e gestão de rejeitos de minério.

No presente trabalho, estão sendo apresentados ensaios a compressão no concreto produzido a partir rejeitos de minério, a fim de fazer uma comparação com o concreto usual do tipo CP II, de modo a refletir sobre possíveis aplicações do traço em estruturas convencionais e especiais, e as vantagens de sua utilização. Além da abordagem experimental foram feitas pesquisas de modo a compreender conceitos para contextualizar os problemas e os resultados obtidos

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A construção civil é apontada como um dos setores que mais causa impactos prejudiciais ao meio ambiente. Ela se destaca como a atividade que mais produz detritos na sociedade. Esses resíduos têm diversas origens, abrangendo desde a etapa de produção de materiais até a extração de matérias-primas, o desperdício durante a execução de obras e a realização de demolições, entre outros fatores (NETO, 2005).

Com este estudo, objetiva-se conduzir uma pesquisa para analisar a resistência à compressão do concreto fabricado a partir do "cimento verde". Dessa forma, o presente estudo estruturou-se em: conceito de cimento Portland; conceito de cimento verde; processos de fabricação; benefícios ambientais do cimento verde.

2.1 Conceito de cimento Portland

Inicialmente, é necessário entender como se consolida a formação do cimento Portland, que se dá por meio de duas reações: calcário (carbonato de cálcio) e argila (silicatos de alumínio e ferro).

Por meio destas matérias-primas são extraídos os óxidos necessários para sua hidratação. O carbonato de cálcio (CaCO_3) aquecido em alta temperatura forma o cal (CaO) e libera CO_2 para a atmosfera. Já da argila são extraídos os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

Conforme abordado pelo ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), os antigos monumentos, encontrados no Egito antigo, já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. Mas, somente em 1824, que o cimento surgiu de fato, com os estudos de Joseph Aspadin. Ele queimou, juntamente as pedras calcárias, argila, transformando assim, em um pó fino. Ao fazer isso, ele percebeu que, ao adicionar água, obtinha uma mistura e, ao secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções e não se dissolvia em água. Depois da conclusão desse estudo, o produto foi patenteado pelo construtor como cimento Portland, nome escolhido por ele por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland.

De acordo com Castro (2021), esse cimento, desenvolvido por Joseph Aspadin, é um cimento inorgânico de baixa granulometria que, quando misturado com água, forma uma pasta, que endurece em virtude de reações e processos de hidratação, mantendo assim sua resistência e estabilidade. Além disso, o autor expõe ainda que o cimento é o principal responsável pela transformação da mistura dos materiais componentes dos concretos e das argamassas no produto final almejado. Ademais, a ABCP enfatiza que, na forma de concreto, esse cimento se torna uma pedra artificial, que pode ganhar formas e volumes, de acordo com as necessidades de cada obra. Outro ponto importante de se mencionar acerca do cimento Portland é a alta concentração de clínquer encontrado em sua composição. O clínquer é formado por uma mistura de calcário, argila e minério de ferro.

2.2 Processo de Fabricação de Cimento Portland

A fabricação do cimento Portland, é composta por sílica, óxido de cálcio, alumina, óxido de ferro III e óxido de magnésio, é caracterizada por um processo que gera uma considerável quantidade de poluição ambiental devido à emissão de

substâncias poluentes (NBR 5732:1991).

O uso do cimento Portland não é a opção mais viável, visto que os estudos realizados por Rebmann (2011), afirmam que esse material gera uma alta emissão de CO₂ na atmosfera. Em números, chega a 1.000kg de CO₂ por tonelada de cimento produzido. Sabe-se que a emissão de CO₂ colabora com diversas alterações climáticas, como chuva ácida e poluição do ar. Por isso, é necessária a utilização de cimentos sustentáveis, para preservar tanto a natureza, como a vida dos seres humanos.

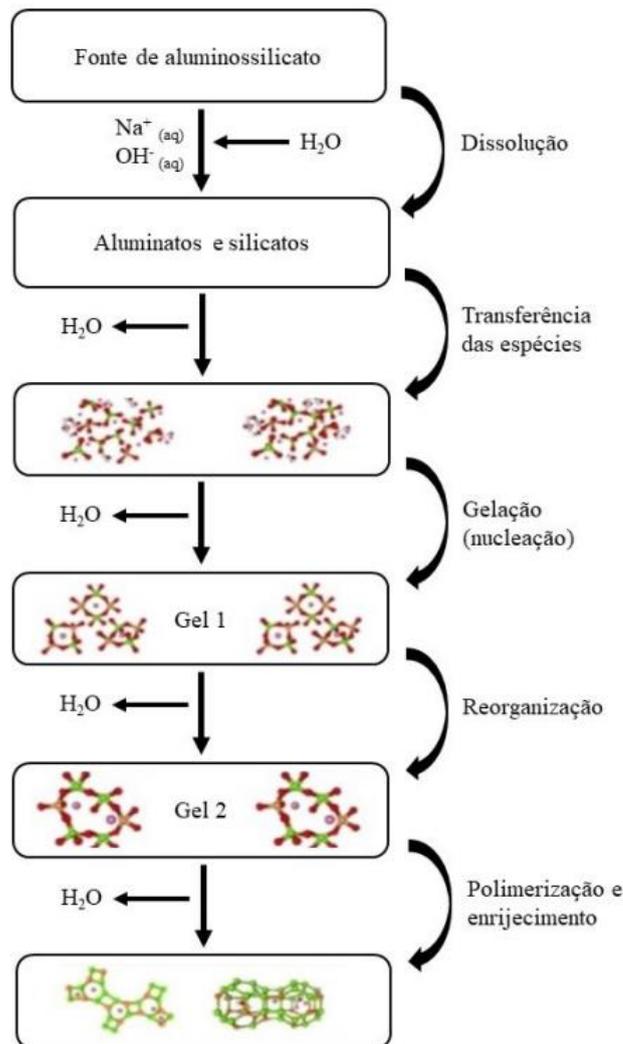
Além disso, o processo de fabricação desse cimento por si só já emite CO₂ suficiente para a poluição do ar. De acordo com Lopes (2011), os números chegam a 150 mil toneladas de dióxido de carbono por ano, o que torna as indústrias de cimento responsáveis por pelo menos 5% do gás carbônico produzido no mundo todo. Esse número, apesar de parecer pequeno, é devastador para o ambiente. Por isso, é indispensável a formulação de cimentos sustentáveis.

Por vez o SNIC (2017) expõe as etapas da fabricação do cimento conforme Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP,2010). As quais são em primeiro lugar a extração do calcário e argila, logo em seguida a britagem e seu armazenamento. Nisso esse material é retido no silo e depois levado para o forno rotativo e para o resfriador. Na fase final é feita a adição e a moagem do cimento e esse material é retido no silo de cimento o qual é encaminhado para a expedição.

2.3 Conceito de cimento verde

Os cimentos geopoliméricos são produzidos pela mistura de materiais que contêm SiO₂ e Al₂O₃ em proporções adequadas e reativas, como cinzas, argilas ativas ou escórias, com uma solução alcalina aquosa ativadora que inclui substâncias como hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de sódio (NaOH) ou silicato de sódio ou potássio. Em outras palavras, são materiais aluminossilicatos ativados por álcalis que podem ser formados pela combinação desses componentes (BUCHWALD; ZELLMANN; KAPS, 2011), conforme figura 1.

Figura 1: Modelo conceitual de geopolimerização.



Fonte: Adaptado de Duxson (2006).

Trata-se de um produto feito a partir de resíduos em geral. Para que o cimento verde seja fabricado, é necessário utilizar técnicas de moagem de maneira específica, desidratando a matéria-prima e processando outros elementos químicos. O resultado dessa mistura dá origem ao chamado cimento ecológico. Seu objetivo é diminuir a exploração de matéria-prima da natureza e a redução da emissão do gás carbônico.

Quando comparado ao Cimento Portland, possui vantagens físico-químicas e ecológicas. Os autores BORGES et al (2014) apontam a possibilidade de produção em temperatura ambiente sem aparente liberação de CO na atmosfera (ou até 80°C). Também é ressaltado que, o desenvolvimento da resistência mecânica pode ser bem rápido e a durabilidade química ótima.

No que se refere à emissão de carbono, segundo Davidovits (2013) o emprego do cimento geopolimérico em substituição ao cimento Portland pode gerar uma redução de 75 a 90% nas emissões de CO₂.

2.4 Rejeitos de Minério

Ao longo de vários anos, as barragens de contenção para armazenar os rejeitos oriundos da mineração, detinham da preferência das mineradoras (FIGUEIREDO, 2007; PORTES, 2013). Segundo o IBRAM (2016) as barragens de contenção ainda possuem superioridade, sendo dos métodos de disposição de rejeitos o mais usado. Contudo, de acordo com PORTES (2013), essas estruturas, com o decorrer do tempo, podem apresentar riscos. De acordo com (FEAM, 2020), em sua publicação anual referente ao ano de 2020, somente no estado de Minas Gerais, existem 654 barragens de rejeitos e resíduos, sendo 404 referentes à mineração, 85 de indústria e 165 destilaria de álcool. Nos dados da Agência Nacional de Mineração-ANM (2022), estão cadastradas 198 barragens que possuem como minério principal o minério de ferro.

Os rejeitos de mineração são definidos como as sobras do minério, ou seja, todo resíduo gerado quando a água é utilizada para limpar o minério e que não tem valor comercial pode ser considerado rejeito. É composto por partículas bem pequenas derivadas do material explorado. O material pode ser classificado de acordo com a sua granulometria, podendo ser denominado “rejeitos granulares”, quando são materiais mais grossos, ou “lama”, quando os rejeitos são muito finos. O processo que utiliza água e gera muito rejeito ainda é bastante adotado pelas mineradoras devido ao seu baixo custo. Porém, já há processos de beneficiamento menos degradantes para o meio ambiente, sem a utilização de água, mas eles apresentam um custo muito elevado.

O rejeito de minério de ferro (IOT) é composto principalmente de óxidos de silício (SiO₂), de alumínio (Al₂O₃), de cálcio (CaO), de ferro (Fe), de manganês (Mn), de enxofre (S), de fosfatos e algumas composições de metais pesados (YANG 22 et al., 2014). A figura 2 a seguir, ilustra o processo de empilhamento do rejeito da mineração.

Figura 2: Rejeito de minério.



Fonte: Armac (13 de setembro – 2021).

A fim de minimizar os problemas criados pelos rejeitos da mineração, iniciou-se o desenvolvimento de pesquisas visando contribuir para minimizar os impactos negativos ambientais associados ao gerenciamento complexo e oneroso dos resíduos da mineração de ferro, além de encontrar soluções rentáveis e eco-compatíveis para estes resíduos (BANDOPADHYAY et al, 2002; JOHNSON et al., 1992). De certo, uma área potencial de aplicação é explorar sua utilização na construção civil. Isto porque existe um maior potencial neste setor, onde os resíduos reciclados poderiam ser utilizados como materiais de construção (SHETTY, et al., 2008).

2.5 Concreto

O concreto é um material composto, constituído por cimento, água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (pedra ou brita) e ar, pode conter adições com a finalidade de melhorar suas propriedades básicas (Couto *et al*, 2013).

No final do século XIX, a invenção do concreto provocou uma revolução na indústria da construção, transformando radicalmente os métodos construtivos. Tornou-se o material predominante na construção civil, sendo o segundo mais utilizado no mundo, ficando atrás apenas da água em termos de consumo (Isaia, 2007).

Segundo Metha e Monteiro (2008) três fundamentos destacam a essencialidade do concreto na construção civil. Primeiramente, sua resistência à água e propriedades o distinguem de materiais como madeira e aço, pois não sofre

danos significativos quando exposto a esse elemento. Em segundo lugar, sua maleabilidade é crucial, pois diversas técnicas possibilitam a criação de moldes e tamanhos variados. A terceira razão reside na combinação de baixo custo e rapidez na elaboração durante a construção, devido aos valores acessíveis dos agregados, água e cimento, disponíveis em qualquer parte do mundo.

O concreto é o material mais empregado na construção civil e é obtido por meio da combinação de cimento Portland, areia, brita e água. Suas categorias variam de acordo com características como densidade, composição e processo de elaboração. As classificações principais incluem o concreto de densidade normal, que contém areia natural e pedregulhos ou agregados britados em sua composição; o concreto leve, que incorpora agregados com menor densidade de massa; e o concreto pesado, que apresenta agregados de alta densidade em sua constituição (Metha e Monteiro, 2008).

Atualmente há diversos estudos com o intuito de produzir concretos ecologicamente sustentáveis, Capanema et al (2012) afirmam que o uso de diversos rejeitos, substituindo agregados naturais, mostrou-se como uma prática ecologicamente viável, o que confirma a potencialidade do aproveitamento dos materiais reciclados na produção de concreto.

Capanema et al (2012) observaram que a adição de rejeitos ao concreto alterou suas principais características. Alguns materiais apresentados aumentaram a resistência do concreto já outros materiais, apesar de diminuir-na, podem ser usados em situações que essa não é muito necessária.

Com base nas informações apresentadas, podemos afirmar que o concreto é o material predominante na indústria da construção civil, pelo menos no contexto brasileiro. Diante disso, torna-se imperativo um diálogo sobre sustentabilidade, uma vez que o cimento utilizado na composição do concreto é responsável por consideráveis emissões de carbono. Portanto, a adoção de materiais para substituição do cimento Portland é essencial para promover uma indústria mais ecologicamente responsável.

3 METODOLOGIA

Com o presente estudo quantitativo, pretendeu-se desenvolver uma pesquisa acerca de avaliar a resistência do concreto produzido com o “cimento verde”, sem emissão de CO₂, utilizando rejeitos de minério e livre de clínquer. Utilizando o método de pesquisa básica com exploração bibliográfica e ensaios de laboratório de modo a analisar a resistência do concreto produzido com o “cimento verde” comparado a resistência do concreto produzido com cimento Portland.

Para a realização deste trabalho, utilizou-se o laboratório de ensaios localizado em Belo Horizonte, Minas Gerais. Nele, foram realizados ensaios de resistência à compressão, de maneira a manusear uma prensa LM300. Para a condução dos ensaios, foram produzidos dez corpos de prova com o Cimento CII E 40 RS Nacional e outros dez corpos de prova com o cimento verde AAC 40. Essa produção tinha como objetivo comparar e avaliar a resistência à compressão para 1, 3, 7, 14 e 28 dias de idade, com a intenção que os dois concretos atingissem o FCK de 25 MPa.

Os concretos foram testados nas composições de cimento-agregados na proporção de 1:3, utilizando um teor de argamassa de 55%. Foi utilizado brita 0, brita 1, areia artificial, areia natural, cimento Portland CP II E 40 RS Nacional e cimento verde AAC 40, conforme parâmetros demonstrados na tabela 1 a seguir. Os parâmetros adotados foram fornecidos pela empresa fabricante do cimento verde AAC 40.

Tabela 1: Parâmetros utilizados para a moldagem dos corpos de prova

PARÂMETROS GERAIS				CP II E 40 RS NACIONAL (MPa)	AAC 40 (MPa)
Parâmetros	A/L			0,6	0,6
	% Argamassa			0,55	0,55
	Água (l)			190	190
	Slump			12 ± 2	12 ± 2
	Consumo ligante (kg/m ³)			317	317
	Betonada (l)			25	25
Betonada 25 litros	Cimento	3,05	100,00%	7,92	7,92
	Areia Natural	2,6	30%	6,61	6,61
	Areia Artificial	2,65	70%	15,43	15,43
	Brita 0	2,63	25%	6,13	6,13
	Brita 1	2,64	75%	18,38	18,38
	Água	1	100%	4,75	4,75
	Aditivo		1,50%	118,75	118,75

Fonte: Autores (2023).

No laboratório, após a pesagem dos materiais, foi realizada a primeira betonada de concreto utilizando o cimento Portland CP II E 40 RS NACIONAL. Para as duas betonadas foram respeitadas a mesma ordem de introdução de materiais na betoneira, sendo: Brita 1, brita 0, cimento, areia artificial, areia natural e água. A figura 3 ilustra os materiais utilizados nos ensaios.

Figura 3: Materiais utilizados nos ensaios.



Fonte: Autores (2023).

Após a mistura do concreto, foi realizado o teste de slump nos dois concretos, alcançando 12,5 cm para o concreto utilizando o cimento CP II E 40 e 11 cm para o cimento ACC 40, conforme figura 4 abaixo alcançando os parâmetros de slump propostos anteriormente.

Figura 4: Moldes dos testes slump, realizados nos diferentes concretos.



Fonte: Autores (2023).

Após a realização dos testes de slump, foram moldados os corpos de prova para a realização dos ensaios à compressão. Para cada betonada foram moldados 10 corpos de prova, sendo identificados como CON 113 os corpos de prova utilizando o cimento Portland CII E e como CON 114 para os corpos de prova utilizando o cimento verde ACC 40, conforme figura 5 abaixo.

Figura 5: Molde dos corpos de prova para o ensaio de compressão axial.



Fonte: Autores (2023).

Após a moldagem dos corpos de prova, foi definido o tempo de cura para a realização dos ensaios à compressão, sendo 2 corpos de prova de cada concreto rompidos com 1, 3, 7, 14 e 28 dias. Objetivou-se viabilizar um método comparativo entre as resistências alcançadas pelo concreto produzido com o cimento verde e o concreto produzido com cimento Portland, bem como uma análise sobre a possível utilização do cimento verde na construção civil e possíveis benefícios ao meio ambiente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

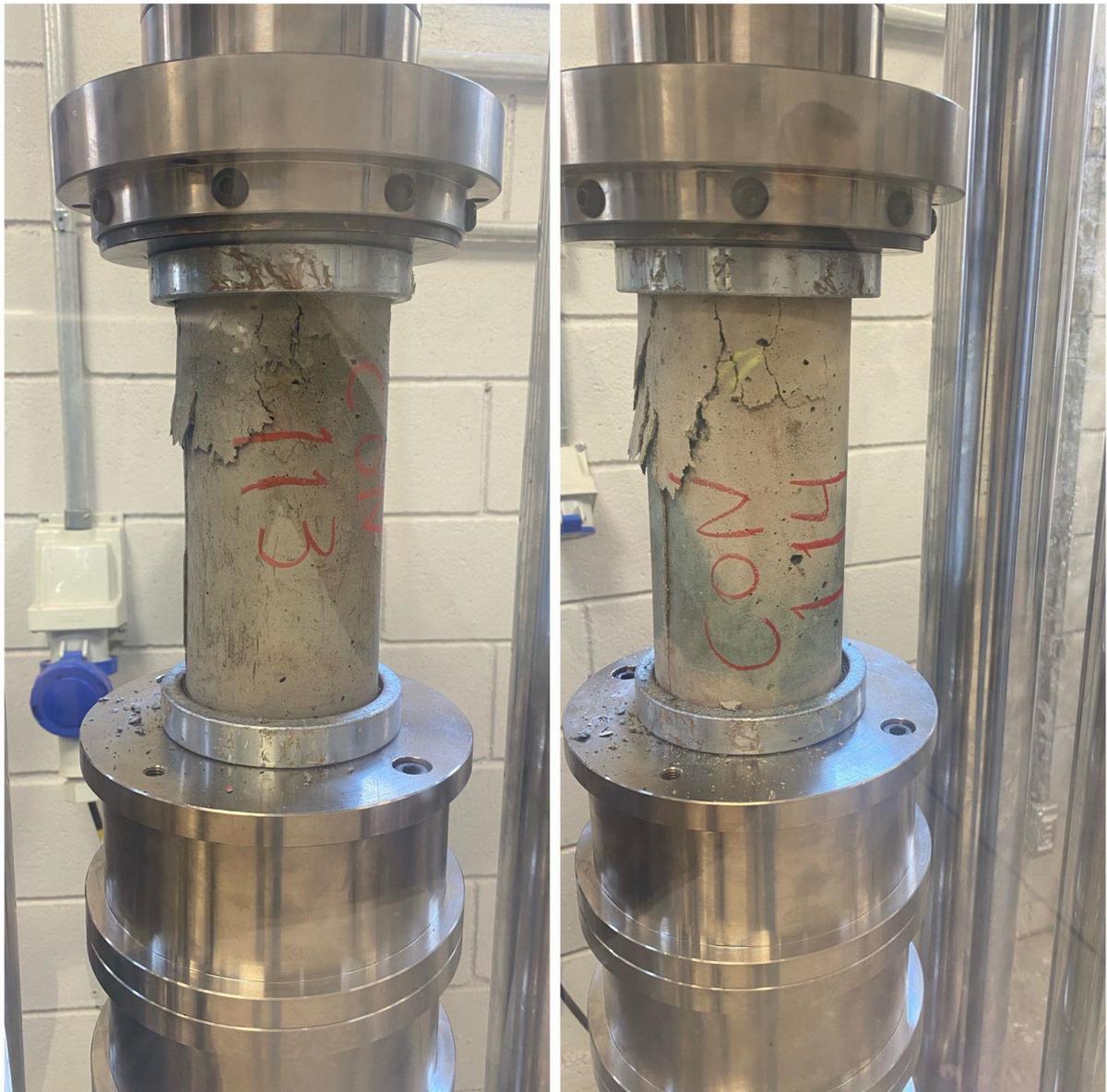
A construção deste estudo possibilita idealizar que através da busca de materiais ecológicos e da sustentabilidade se torna possível amenizar os impactos ambientais causados pela produção do cimento Portland. O estudo evidencia ainda que o uso do cimento verde é vital para auxiliar as empresas a alcançarem parâmetros

elevados de responsabilidades frente ao meio ambiente.

Nos rompimentos dos corpos de prova foram identificados as cores características do concreto utilizando o cimento verde AAC 40 (CON 114), sendo predominantemente mais escuro do que o concreto utilizando o cimento Portland (CON 113).

As figuras 6 e 7 a seguir representam, respectivamente, a realização do rompimento dos corpos de prova respeitando o tempo de 3 dias, utilizando a prensa LM300 e as imagens dos corpos de prova após o ensaio.

Figura 6: Teste de compressão dos corpos de prova com 3 dias.



Fonte: Autores (2023).

Figura 07: Imagens dos corpos de prova rompidos utilizando o cimento verde (CON 114) e o cimento Portland (CON 113).



Fonte: Autores (2023).

Nos ensaios realizados com 28 dias foram identificados uma diferença de 9,3 MPa entre os concretos, sendo o realizado com cimento verde o de maior resistência alcançada. A figura 08 a seguir, ilustra os corpos de prova rompidos no vigésimo oitavo dia.

Figura 08 - Imagens dos corpos de prova rompidos.



Fonte: Autores (2023).

Os resultados foram analisados após os ensaios de compressão nos corpos de prova após 1, 3, 7, 14 e 28 dias. A tabela 2 identifica os principais dados obtidos através dos ensaios realizados.

Tabela 02: Resultados de resistência à compressão

Data moldagem	31/10/2023	ID	CP II E 40RS NACIONAL (Mpa)	AAC 40 (Mpa)
Resistência à Compressão	1D	CP 1	8,83	11,29
		CP 2	7,61	11,33
	01/11/2023	Média	8,2	11,3
	3D	CP 1	20,01	24,40
		CP 2	17,86	23,70
	03/11/2023	Média	18,9	24,1
	7D	CP 1	26,21	31,05
		CP 2	26,21	31,80
	07/11/2023	Média	26,2	31,4
	14D	CP 1	29,71	37,91
		CP 2	30,12	37,36
	14/11/2023	Média	29,9	37,6
	28D	CP 1	32,23	40,69
		CP 2	31,84	41,85
28/11/2023	Média	32,0	41,3	

Fonte: Autores (2023).

4.1 Diferenciais do cimento verde

Conforme a tabela 02, a definição do traço, em função das propriedades físicas dos materiais, possibilitou um melhor desempenho utilizando o cimento verde comparado ao convencional (Portland), sendo, portanto, plausível a utilização deste. Principalmente quando se trata da diferença da emissão do gás poluente, o qual já é visado.

Considerando que o Brasil lidera a 6^o posição dos países que mais produzem cimento, existe a possibilidade de ser implementado uma norma, na qual taxa o produtor do cimento pela quantidade de dióxido de carbono(CO₂) emitido no ar.

O cimento verde produzido a partir de rejeitos de minério, se mostra uma alternativa para o desenvolvimento sustentável, devendo ser considerada sua utilização no mercado a fim de diminuir os impactos ambientais.

A reutilização e destinação final de rejeitos oriundos da mineração, é uma alternativa inovadora, visto que, a destinação dos rejeitos não seriam feitas em barragens a montante, o que traz mais segurança e evita desastres ambientais, preservando o ecossistema e a vida.

4.2 Propriedades mecânicas

Os resultados obtidos nos ensaios à compressão demonstram que o cimento verde possui resistência à compressão superior ao cimento Portland, como evidenciado na Tabela 2, concluindo com os ensaios realizados, propriedades mecânicas superiores ao cimento Portland.

No que se refere às propriedades mecânicas avaliadas, constatou-se que houve um ganho significativo de resistência à compressão do concreto produzido a partir de cimento verde utilizando rejeitos de minério.

A partir dos resultados encontrados nos ensaios realizados após 1,3,7,14 e 28 dias chegamos a um aumento médio de cerca de 24% de resistência à compressão comparado ao cimento Portland.

Esses dados sugerem que o uso de cimento verde produzido a partir de rejeitos de minério, podem resultar em um concreto mais resistente e durável, podendo substituir o cimento mais utilizado nas construções civis e conseqüentemente contribuir efetivamente para o avanço sustentável nesse ramo.

5 CONCLUSÃO

A indústria da construção civil busca de maneira insistente, materiais alternativos que visam a redução dos impactos ambientais, redução de custos, durabilidade e melhoria das propriedades do produto final. A preocupação com a sustentabilidade não é apenas sobre demandas ambientais, mas também por uma melhoria na qualidade de vida.

A utilização de rejeitos de minério na produção de cimento verde apresenta uma abordagem sustentável na gestão de resíduos da indústria mineradora e no aumento de segurança nos depósitos dos resíduos, por reduzir ou até mesmo ter potencial de descaracterizar barragens a montante. A redução significativa das emissões de dióxido de carbono (CO₂) é um dos principais benefícios associados à utilização do cimento verde, que diminui a emissão de gases poluentes contribuintes do efeito estufa e o conseqüente aquecimento global.

O cimento verde quando utilizado na produção do concreto, além de agregar vantagens ambientais, apresenta elevadas resistências à compressão, como demonstrado nesse estudo, contribuindo para o desenvolvimento de materiais eficientes e duráveis, podendo ser empregado em estruturas e demais áreas da construção civil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem e expressam profunda gratidão a Professora Luana Maris Pedrosa Cruz Ercan, que foi a orientadora dedicada, atenciosa e inspiradora durante todo o processo de elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Sua orientação foi fundamental para o andamento deste projeto.

Agradecemos pela paciência demonstrada ao longo das orientações, pela disposição em fazer reuniões fora dos horários de aula e pela capacidade de guiar-nos na estruturação do trabalho, dando orientações que enriqueceram o conteúdo.

Agradecemos também pelo estímulo constante à busca pelo aprimoramento acadêmico e pela dedicação em fornecer feedback construtivo, que contribuiu significativamente para o desenvolvimento e aperfeiçoamento desta pesquisa.

Agradecemos pela sua orientação e pela oportunidade de aprender sob sua tutela. Esta conquista é, em grande parte, resultado do seu compromisso e mentoreamento excepcionais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6022**: informação e documentação - artigo em publicação periódica técnica e/ou científica - apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação - trabalhos acadêmicos - apresentação. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação - trabalhos acadêmicos - apresentação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005

Borges, Paulo Henrique Ribeiro et al. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II), Porto Alegre, 2014.

BUCHWALD, A; ZELLMANN, H.-D; KAPS, C.; Condensation of Aluminosilicate Gels: model system for geopolymer binders. *Journal of NonCrystalline Solids*, v. 357, n. 5, p. 1376-1382, 2011.

CAPANEMA, Denise Christie de Oliveira et al. Estudo do uso de rejeitos como agregados para o concreto. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

CASTRO, V. G. Cimento Portland. In: *Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro*. Mossoró: EDUFERSA, 2021

COUTO, José Antônio Santos *et al.* O concreto como material de construção. Universidade Tiradentes, Aracaju, 2013.

FIGUEIREDO, M. M. Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 118 p. 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Gestão e manejo de rejeitos da

mineração, Brasília, 2006.

ISAIA, Geralco C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

LOPES, F. D. Créditos de carbono na indústria do cimento. Orientador: Luiz Elody. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.

NETO, José da Costa Marques. Gestão de Resíduos de construção e demolição no Brasil São Carlos: RiMa, 2005.

PORTES, Andréa Mírian Costa. Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

REBMANN, M. S. Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência. Dissertação (Mestrado em Engenharia de estruturas); Escola de Engenharia de São Carlos; Departamento de Engenharia de estruturas; Laboratório de materiais avançados à base de cimento, Universidade de São Paulo; São Carlos-SP, 2011.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Dados do Setor. 2016. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>> .

YELLISHETTY, M., KARPE, V., REDDY, E. H., SUBHASH, K. N., e RANJITH, P. G., 2008, “Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study”, Resources, Conservation and Recycling, 52(11), 1283–1289.

BEZERRA, Juliana. Desastre de Mariana. Toda Matéria, [s.d.]. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/desastre-de-mariana/>. Acesso em: 2 dez. 2023.

SHOW, Redação Concrete. O impacto do aquecimento global na construção civil. Concrete Show, 19 de janeiro de 2023. Disponível em <https://digital.concreteshow.com.br/inovao/o-impacto-do-aquecimento-global-na-construo-civil>. Acesso em: 2 dez. 2023.

ROMPIMENTO DE BARRAGEM EM BRUMADINHO.WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2023. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Rompimento_de_barragem_em_Brumadinho&oldid=66552618>. Acesso em: 7 set. 2023.