

UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS – PPGCEM

JOÃO ROBERTO MENDES

DESENVOLVIMENTO DE PASTA CONDUTIVA COM ADIÇÃO DE GRAFITE E PÓ
DE FERRO

CRICIÚMA, 2022

JOÃO ROBERTO MENDES

**DESENVOLVIMENTO DE PASTA CONDUTIVA COM ADIÇÃO DE GRAFITE E PÓ
DE FERRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense UNESC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin

CRICIÚMA, 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

M538d Mendes, João Roberto.

Desenvolvimento de pasta condutiva com adição de grafite e pó de ferro / João Roberto Mendes. - 2022.

63 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2022.

Orientação: Adriano Michael Bernardin.

1. Pasta de cimento. 2. Cimento portland. 3. Resistência à compressão. 4. Resistividade elétrica. 5. Concreto - Propriedades elétricas. I. Título.

CDD. 22. ed. 620.136

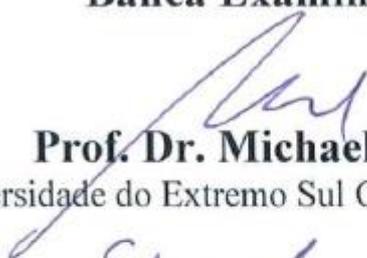
JOÃO ROBERTO MENDES

**DESENVOLVIMENTO DE PASTA CONDUTIVA COM ADIÇÃO DE GRAFITE E PÓ
DE FERRO**

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre (a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

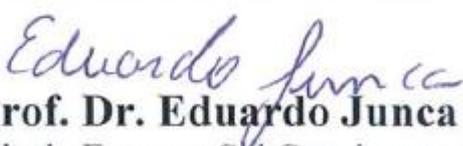
Criciúma, SC, 31 de março de 2022.

Banca Examinadora:



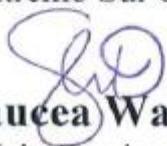
Prof. Dr. Michael Peterson

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Eduardo Junca

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof^a. Dr^a. Glauce Warmeling Duarte

Centro Universitário Barriga Verde– UNIBAVE

A minha família, amigos e todos os professores que passaram em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde e pela vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin pela oportunidade, confiança e incentivo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM/ UNESC.

A Civltech laboratório de Concreto e Solos e seu diretor Eng. Especialista Lucas dos Santos de Souza, por toda a disponibilidade de estrutura, tempo e conhecimento compartilhado.

Aos meus colegas e amigos do PPGCEM, em especial a Rafael Kamura, Diórgenes Mattos e Leonardo Fontanela, por tantos momentos e parceria nessa caminhada.

A minha namorada Ana Paula de Souza, por toda paciência e dedicação em minha ausência, à minha família e amigos por acreditarem em mim e me incentivarem a todo o momento.

A CAPES pelo apoio financeiro.

“Se pude enxergar mais longe, foi por estar em
sobre ombros de gigantes”

Isaac Newton

RESUMO

O emprego de materiais para melhorar ou criar novos produtos finais é cada vez mais comum. Na construção civil, existe uma busca constante por produtos inovadores, que possam melhorar o desempenho e a qualidade dos produtos e que sejam comercialmente viáveis, o que é de suma importância para todo o setor. Os problemas com a remoção do gelo nas rodovias, o alto custo com o aquecimento térmico de ambientes e sua estrutura, e os constantes problemas de ruptura no concreto de postes devido a descargas atmosféricas, mostra a necessidade de revestimentos cimentícios com propriedades específicas. O concreto, em sua formulação, tem propriedades resistivas à passagem da corrente elétrica, devido sua composição apresentar cerca de 60 a 70% de agregados, que têm características resistivas. Para se obter um material com boa condutividade elétrica é preciso estudar inicialmente a pasta de cimento, seguindo para a argamassa, e conseqüentemente seu produto, o concreto. Este trabalho teve como objetivo estudar a condutividade da pasta de cimento, utilizando os cimentos CPIV e CPV, com adição de grafite e pó de ferro com a finalidade de diminuir sua resistência elétrica. Para tanto, foi utilizado um planejamento fatorial 2^k tendo como fatores o tipo de cimento (CPIV e CPV), a adição de grafite (5% referente a massa de cimento) e a adição de pó de ferro (5% referente a massa de cimento), resultando em 9 formulações (com 1 ponto central). As pastas foram formuladas com uma razão $A/C = 0,45$ seguindo o mesmo procedimento de mistura. Foram preparados 3 corpos-de-prova cilíndricos para cada formulação com 25 cm de comprimento e 5 cm de diâmetro. Aos 28 dias de cura, as amostras foram ensaiadas para determinar sua resistência à compressão axial e resistividade elétrica. Referente à resistência à compressão axial, os melhores resultados foram referente a formulação da pasta com cimento CPV + 5% de grafite, e com relação ao ensaio de resistividade elétrica, os melhores resultados foram referente a formulação da pasta com cimento CPV + 5% de pó de ferro. Como sugestão de trabalhos futuros, as melhores formulações devem ser utilizadas para elaboração da argamassa e concreto, para que se possa desenvolver o concreto condutivo.

Palavras-chave: Pasta de cimento. Cimento Portland. Resistência à compressão. Resistividade elétrica.

ABSTRACT

The use of materials to improve or create new products is increasingly common. In civil construction, there is a constant search for innovative products that can improve the performance and quality of products and that are commercially viable, which is of paramount importance for the entire sector. The problems with the removal of ice on the highways, the high cost of thermal heating of environments and its structure, and the constant problems of rupture in the concrete of poles due to atmospheric discharges, show the need for cementitious coatings with specific properties. Concrete, in its formulation, has resistive properties to the passage of electric current, due to its composition having about 60 to 70% of aggregates, which have resistive characteristics. To obtain a material with good electrical conductivity, it is necessary to study initially the cement paste, followed by the mortar, and consequently its product, the concrete. This work aimed to study the conductivity of cement paste, using CPIV and CPV cements, with the addition of graphite and iron powder in order to reduce its electrical resistance. For that, a 2k factorial design was used, having as factors the type of cement (CPIV and CPV), the addition of graphite (5% referring to the cement mass) and the addition of iron powder (5% referring to the cement mass), resulting in 9 formulations (with 1 central point). The pastes were formulated with a W/C ratio = 0.45 following the same mixing procedure. Three cylindrical specimens were prepared for each formulation with 25 cm in length and 5 cm in diameter. After 28 days of curing, the samples were tested to determine their axial compressive strength and electrical resistivity. Regarding the axial compressive strength, the best results were related to the formulation of the paste with CPV cement + 5% graphite, and in relation to the electrical resistivity test, the best results were related to the formulation of the paste with CPV cement + 5% of iron powder. As a suggestion for future work, the best formulations should be used for the preparation of mortar and concrete, so that conductive concrete can be developed.

Keywords: Cement paste. Portland cement. Compressive strength. Electrical resistivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processo de fabricação do cimento	16
Figura 2. Disposição dos eletrodos no concreto, segundo método de Wenner	24
Figura 3. Amostras para ensaio da pasta.....	34
Figura 4. Terrômetro resistivímetro digital.....	35
Figura 5. Execução do ensaio de resistência elétrica das pastas	36
Figura 6. Resistência à compressão axial (MPa) das pastas.....	39
Figura 7. Diagrama de Pareto para a resistência à compressão (MPa) das pastas..	40
Figura 8. Superfície de resposta para a resistência à compressão (MPa) das pastas em função do tipo de cimento e da adição de grafite	42
Figura 9. Resistência elétrica (Ω) das pastas.....	44
Figura 10. Diagrama de Pareto para a resistência elétrica (Ω) das pastas	45
Figura 11. Homogeneização da pasta de cimento com adição de pó de ferro.....	47
Figura 12. Gráficos de médias da resistência elétrica (Ω) das pastas em função do tipo de cimento e da adição de pó de ferro	47
Figura 13. Corrente elétrica (mA) das pastas determinada pelo método de Wenner	48
Figura 14. Diagrama de Pareto para a corrente elétrica (mA) nas pastas	49
Figura 15. Gráficos de superfície de resposta para a corrente elétrica (mA) medida nas pastas em função do tipo de cimento, da adição de grafite, e da adição de pó de ferro.....	50
Figura 16. Tensão elétrica (V) das pastas determinada pelo método de Wenner.....	52
Figura 17. Diagrama de Pareto para a tensão elétrica (V) das pastas.....	53
Figura 18. Gráfico de médias da tensão elétrica (V) das pastas em função do tipo de cimento e da adição de pó de ferro	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais cimentos existentes no Brasil.....	12
Tabela 2. Composição química do clínquer	13
Tabela 3. Limites usuais da composição do cimento Portland	14
Tabela 4. Especificações de norma para os ensaios físicos do CPIV	29
Tabela 5. Especificações de norma para os ensaios físicos do CP V ARI	30
Tabela 6. Composição e concentração do grafite em pó	30
Tabela 7. Propriedades físicas e químicas do grafite em pó	31
Tabela 8. Propriedades físicas e químicas do ferro em pó	31
Tabela 9. Composição das misturas para produção dos corpos-de-prova	32
Tabela 10. Resistência à compressão axial (MPa) das pastas	38
Tabela 11. ANOVA para a resistência à compressão axial das pastas ($R^2 = 0,98$) ..	39
Tabela 12. Resistência (Ω) das pastas determinada pelo método Wenner.....	43
Tabela 13. ANOVA para a resistência elétrica (Ω) das pastas ($R^2 = 0,98$).....	44
Tabela 14. Corrente elétrica (mA) medida nas pastas pelo método de Wenner	48
Tabela 15. ANOVA para a corrente elétrica (mA) medida nas pastas ($R^2 = 0,63$)	49
Tabela 16. Tensão elétrica (V) medida nas pastas pelo método de Wenner	51
Tabela 17. ANOVA para a tensão elétrica (V) medida nas pastas ($R^2 = 0,63$).....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- a - Distância média entre os eixos dos eletrodos;
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR - Norma Brasileira
CP - Corpo de Prova
ANOVA - Análise de variância
ASTM - American Society for Testing and Materials
CP - Cimento Portland
CPV-ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial
CPIV – Cimento Portland pozolânico
C₃S – Silicato Tricálcico
C₂S – Silicato Dicálcico
C₃A – Aluminato Tricálcico
C₄AF – Ferro aluminato tetracálcico
I = Corrente elétrica (A).
mA – Miliampere
MPa - Mega Pascal
mm - Milímetro
MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR - Norma Brasileira
SC - Santa Catarina
t - tonelada
UNESC - Universidade do Extremo Sul Catarinense
V = Diferença de potencial entre os eletrodos internos (V);
(V) – Tensão
Ωm - Ohm metro
ρ = Resistividade elétrica do concreto (Ω.m);

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 OBJETIVOS	9
2.1 Objetivo Geral	9
2.2 Objetivos Específicos	9
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
3.1 CIMENTO. ORIGEM	10
3.2 CIMENTO PORTLAND. CONCEITO.....	11
3.3 CIMENTO PORTLAND. COMPOSIÇÃO.....	12
3.3.1 CLÍNQUER.....	13
3.3.2 ADIÇÕES E SUAS FUNÇÕES.....	14
3.4 CIMENTO PORTLAND. PROCESSO DE PRODUÇÃO.....	15
4. CONCRETO E SUAS PROPRIEDADES	16
4.1 ESTADO FRESCO. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.....	17
4.2 ESTADO FRESCO. CONSISTÊNCIA.....	17
4.3 ESTADO FRESCO. PLASTICIDADE	18
4.4 ESTADO FRESCO. EXSUDAÇÃO	18
4.5 ESTADO FRESCO. TRABALHABILIDADE.....	19
4.6 ESTADO ENDURECIDO. DURABILIDADE	19
4.7 ESTADO ENDURECIDO. RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	20
5 AGREGADOS	21
6. RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO CONCRETO.....	22
6.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO CONCRETO. MEDIÇÃO	24
6.2 CONCRETO CONDUTIVO	26
6.3 GRAFITE.....	27
7. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
7.1 MATERIAIS. CIMENTO CPIV	29
7.2 MATERIAIS. CIMENTO CPV ARI (ALTA RESISTÊNCIA INICIAL).....	29
7.3 MATERIAIS. GRAFITE.....	30
7.4 MATERIAIS. FERRO EM PÓ	31
7.5 MATERIAIS. ÁGUA.....	32
7.6 MÉTODOS. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DA PASTA DE CIMENTO	32

7.6.1 DETERMINAÇÃO DA PASTA ÓTIMA	34
7.7 MÉTODO. DETERMINAÇÃO DA RESISTIVIDADE DAS PASTAS DE CIMENTO.....	35
7.8 MÉTODO. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS PASTAS DE CIMENTO	36
8. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
9 CONCLUSÕES	55
10 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
11 REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

A necessidade diária de desenvolvimento de novos materiais para suprir o avanço tecnológico e diminuir o impacto ambiental exige da humanidade o encontro de meios para produzir um determinado produto, da forma mais sustentável possível e que possa ser útil em vários segmentos. Considera-se então neste contexto o desenvolvimento de um tipo de concreto com alta condutividade elétrica, sendo que a ABNT NBR 12655:2015 define concreto de cimento Portland como um material constituído pela mistura de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários, como os aditivos químicos, metacaulim ou sílica ativa. E para se chegar ao desenvolvimento do concreto, é necessário o estudo da pasta de cimento e da argamassa.

Segundo a ABNT NBR 13281 (2018), argamassa é a mistura homogênea de agregados miúdos (areia), aglomerantes (cimento), e água, podendo conter ainda aditivos, possuindo dessa forma, propriedades de aderência e endurecimento.

O concreto pode ser considerado como qualquer produto ou massa resultante de um meio cimentante, sendo esse meio o produto que sofre uma reação entre um cimento hidráulico e a água, podendo ser definido mais simplesmente como a mistura de água, agregados miúdos e graúdos e aditivos (Neville e Brooks, 2013).

Mehta e Monteiro (2008) mencionam que o concreto é o material da construção civil mais utilizado no mundo, composto basicamente de cimento, areia, brita e água, definindo suas aplicações devido a sua excelente resistência à ação da água, seu baixo custo e sua facilidade de ser moldado de diferentes formas e tamanhos. Desse modo, os benefícios de sua utilização dependem da qualidade do concreto a ser utilizado e seus componentes.

Porém, segundo Polder (2001), o concreto apresenta resistividade elétrica, que é determinada pela dificuldade com que os íons se movimentam no interior do concreto, e sua medida depende de vários fatores como: composição da mistura, tamanho e grau de conectividade dos poros, temperatura, contaminação de íons cloreto e sulfatos, grau de carbonatação, além de condições de exposição do concreto e da umidade relativa do ar. A resistividade também é conhecida como a propriedade

inversa à condutividade elétrica, limitando assim a utilização do concreto em outros segmentos na construção civil.

O concreto, por ser composto de materiais isolantes, quando saturado em água, apresenta comportamento de semicondutor, com valores de resistividade elétrica da ordem de $10^2 \Omega\text{m}$. Porém, quando o mesmo estiver seco, poderá ser considerado como isolante, apresentando resistividade elétrica da ordem de $10^6 \Omega\text{m}$ (Helene, 1993).

Petrucci (1975) afirma que, dos materiais comuns que compõem o concreto, muitas vezes ao solicitar um concreto com alguma finalidade específica, será necessária a incorporação de adições minerais e outros aditivos químicos. Desta forma, neste trabalho foi estudada a incorporação de grafite e pó de ferro na composição da massa cimentícia.

Segundo Lobato (2009) e Marinho (2014) o grafite é um material que apresenta resistência a elevadas temperaturas, alta condutividade térmica, flexibilidade, potencial de dissipação de calor e expansão térmica. Islam, Rojas, Bergery e Johnson (2003) afirmam que o grafite é um excelente condutor de calor e eletricidade, exibe resistência a agentes químicos e à variação brusca de temperatura, possui boa resistência à compressão, é maleável, refratário em atmosfera inerte, biocompatível, apresentando um ponto de fusão de aproximadamente $3.650 \text{ }^\circ\text{C}$.

Com base nas características mencionadas do grafite e conseqüentemente do ferro em pó, por este ser um metal e, portanto, condutor elétrico, foi feita a adição desses materiais à mistura de argamassa de forma parcial, fazendo com que essa mistura possa ser utilizada em concretos para produção de postes auto aterrados, simplificando a instalação em áreas urbanas e eliminando a necessidade de quebra de pisos e calçadas. Deve-se levar também em consideração que um sistema de aterramento tradicional com haste de cantoneira de aço galvanizado tem uma vida útil esperada de oito anos, sendo que um poste com concreto condutivo e aterramento integrado a sua ferragem de armação tem uma vida útil esperada de, pelo menos, 30 anos (Cannabrava, Ferreira e Pasqua, 2017). Além de aumentar a segurança e a confiabilidade da instalação, o poste auto aterrado diminui custos de manutenção e contribui para diminuir o índice de falha de transformadores da rede de distribuição por descargas atmosféricas.

A remoção de gelo de pavimentos de concreto é tradicionalmente feita com uma combinação de vários métodos, como fusão natural, movimento de tráfego e tratamento químico, esta última utilizando produtos químicos para degelo, causando danos ao concreto e corrosão do aço. Uma fina camada de concreto condutivo elaborado a partir da argamassa pode gerar calor suficiente para evitar a formação de gelo. O concreto condutivo contém componentes eletricamente condutores que atingem alta condutividade elétrica, porém, devido à resistência elétrica e impedância no concreto, o calor deverá ser gerado quando conectado a uma fonte de energia e pode ser usado para descongelar ou congelar (Yehia, Tuan, 2004).

Semim et al. (2016, p.7), denominam o concreto condutivo como uma massa onde os agregados com alta resistividade elétrica são substituídos de forma parcial ou em sua totalidade por materiais condutivos como sulfato de cobre, carvão coque, grafite, dentre outros.

A propriedade de condutividade elétrica dos materiais cimentícios condutores é interessante para sua utilização como aterramento, aquecimento por resistência (para degelo e aquecimento de edifícios), dissipação de carga estática, rodovias inteligentes, geração de energia termoelétrica, e para proteção da armadura do concreto em função da corrosão (Garcês, 2010).

Desta forma, neste trabalho foi estudada a adição de pó de ferro e grafite a dois tipos de cimento, CPIV e CPV, para determinar a condutividade das pastas resultantes. Foi determinada a resistência à compressão das pastas para verificar se as adições alterariam o comportamento mecânico das pastas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudar o efeito da adição de grafite e pó de ferro na condutividade elétrica e resistência mecânica de pastas de cimento Portland.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o efeito da adição de grafite e ferro em pó sobre a condutividade elétrica de cimento Portland em função da fração mássica adicionada;
- Determinar o efeito da adição de grafite e pó de ferro sobre a resistência à compressão axial das pastas de cimento;
- Determinar o tipo de cimento e as frações mássicas de grafite e pó de ferro que otimizam a condutividade elétrica e a resistência à compressão das pastas de cimento estudadas.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CIMENTO. ORIGEM

Em 1756 o engenheiro inglês John Smeaton procurava um aglomerante que endurecesse, mesmo em presença de água, para construir o Farol de Eddystone na Inglaterra. Em uma das tantas tentativas notou que a mistura calcinada de calcário e argila, quando seca, era tão resistente quanto as pedras utilizadas em suas construções. Após a descoberta, o construtor inglês Joseph Aspdin obteve um material pulverulento, no qual ele misturava determinada quantidade de água, obtendo assim uma argamassa, e com o passar do tempo essa mistura gerava um material de dureza parecida com as pedras existentes em Portland. Devido a esta similaridade, em 1824 o construtor patenteou este pó com o nome de cimento Portland. No pedido de patente constava que o calcário era moído com argila, em meio úmido, até se transformar em pó muito fino. A água era evaporada pela exposição ao sol ou por irradiação de calor através de cano com vapor. Os blocos da mistura seca eram calcinados em fornos e depois moídos em um pó bem fino (SNIC, 2006, p.1).

No Brasil, os primeiros registros de produção de cimento são datados no final do século XIX, no estado da Paraíba, onde o funcionamento da unidade industrial durou apenas três meses (SNIC, 2006).

Devido ao desenvolvimento da cidade do Rio de Janeiro e, o fim da Primeira Guerra Mundial, deu-se início a um vasto mercado adicional para o produto. Neste período, o país importava 40 mil toneladas de cimento dos países europeus, onde as tarifas de importação da época eram em torno de 30%. Isso estimulou os empreendedores brasileiros a instalar este tipo de indústria no Brasil. Em 1888 o eng. Louis Felipe Alves da Nóbrega e o Comendador Antônio Prost Rodovalho iniciaram os trabalhos de prospecção no Nordeste e em São Paulo, respectivamente. O eng. Louis Nóbrega buscou a utilização dos calcários encontrados próximos da capital do Estado da Paraíba e o Comendador Rodovalho idealizou o aproveitamento das reservas calcárias de grandes pedreiras situadas nas vizinhanças da cidade de Sorocaba (SNIC, 2012).

Segundo a ABCP (2009), a implantação pela Companhia Brasileira de Cimento Portland de uma fábrica em Perus, Estado de São Paulo, em 1924, pode ser considerada o início da implantação da indústria brasileira de cimento. As primeiras toneladas foram produzidas e colocadas no mercado no ano de 1926, sendo que até este período, o consumo de cimento no país dependia totalmente do produto importado. A produção brasileira foi gradualmente elevada com a construção de novas fábricas e a participação de produtos importados diminuiu durante os anos seguintes, até praticamente desaparecer nos dias de hoje.

3.2 CIMENTO PORTLAND. CONCEITO

A Indústria Brasileira de Cimento (2012) define como cimento Portland o material aglomerante hidráulico que, ao entrar em contato com a água, sofre um processo físico-químico, tornando-se um elemento sólido com grande resistência à compressão, água e sulfatos.

A Norma Brasileira 16697 (2018) diz que o cimento Portland é obtido pela moagem de clínquer, e durante o processo é permitido adicionar a esta mistura de materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto forno e outros materiais carbonáticos, nos teores especificados, sendo possível obter variações do produto inicial com base no tipo de cimento que se deseja produzir.

Neville (2016) menciona que o cimento pode ser descrito como um material que possui propriedades coesivas e adesivas, capaz de unir pequenos minerais resultando em uma forma compacta, sendo essa definição aplicada a uma grande variedade de materiais cimentícios que são conhecidos na construção civil como cimentos. Esse termo é associado a materiais aglomerantes que são utilizados com areias, pedras, blocos, tijolos, entre outros.

Silicatos e aluminatos de cálcio são os principais constituintes do cimento hidráulico, o que, de maneira geral, o classifica como cimento natural, cimento Portland e cimento aluminoso, sendo chamado de cimentos hidráulico devido a sua reação química com a água e seu endurecimento devido à hidratação (Neville, 2016).

O cimento Portland possui características que se relacionam diretamente com as grandezas dos compostos de silicatos e aluminatos. O conhecimento das parcelas dos compostos que constituem o cimento Portland tem sua importância na

correlação destes com as propriedades do produto final, seja o próprio cimento, o concreto ou a argamassa (Oliveira, 2015).

A mistura entre calcário, argila ou outros materiais silicosos, alumina e alguns materiais que possuem óxido de ferro na composição é denominada de Cimento Portland, que após queimada resulta no clínquer (Neville e Brooks, 2013).

Na Tabela 1 pode-se verificar a composição dos principais cimentos existentes no Brasil, segundo a NBR 16697 (2018).

Tabela 1. Principais cimentos existentes no Brasil

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Classe	Componentes (%)			
			Clínquer + Sulfato de Cálcio	Escória de Alto Forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
Comum	CPI	25, 32 ou 40	95 - 100	0 - 5		
	CPI-S		90 - 94	0	0	6 - 10
Composto com escória	CPII-E		51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
Composto com pozolana	CPII-Z		71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
Composto com material carbonático	CPII-F		75 - 89	0	0	11 - 25
Alto Forno	CPIII		25 - 65	35 - 75	0	0 - 10
Pozolânico	CPIV		45 - 85	0	15 - 75	0 - 10
Alta resistência inicial	CPV	ARI	90 - 100	0	0	0 - 10
Branco estrutural	CPB	-	75 - 100	-	-	0 - 25
Branco não estrutural			50 - 74	-	-	26 - 50

Fonte: NBR 16697:2018

As características de utilização do cimento Portland diferenciam-se em relação a suas propriedades, não levando somente em consideração a composição química do clínquer, mas também as adições agregadas ao produto, como escória de alto forno, pozolana, materiais carbonáticos, entre outros (Ribeiro, Pinto e Starling, 2013).

3.3 CIMENTO PORTLAND. COMPOSIÇÃO

Para que se possa conhecer as características de cada cimento e suas propriedades, é necessário estudar a composição dos mesmos. O cimento Portland é composto de clínquer e adições, sendo o clínquer seu principal componente, estando

presente em todos os tipos de cimento Portland, e as adições variam conforme o tipo de cimento desejado.

3.3.1 CLÍNQUER

Segundo o Guia Básico de Utilização do Cimento Portland (ABCP, 2018), o clínquer tem como matérias-primas o calcário e a argila, originadas de jazidas localizadas próximas às fábricas de cimento. Primeiramente, é britada a rocha calcária, logo após essa brita é moída e em seguida misturada, em proporções apropriadas, com argila moída. É formada então uma mistura que atravessa um forno giratório de grandes dimensões, cuja temperatura interna pode alcançar 1.450°C. Essa temperatura elevada altera a mistura e a transforma em um novo material, chamado clínquer, sob a forma de pelotas. Na saída do forno o clínquer, ainda incandescente, sofre um resfriamento brusco, para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó. Esse pó tem a característica de desenvolver uma reação química em presença de água. Primeiramente, torna-se viscoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. Isso faz dele um ligante hidráulico muito resistente, sendo esta sua propriedade mais importante. Na Tabela 2 são apresentados os principais constituintes do clínquer e sua composição química calculados pelas fórmulas de Bogue e na Tabela 3 são apresentados os limites usuais da composição do cimento Portland (Neville, 2016).

Tabela 2. Composição química do clínquer

Nomenclatura	Constituição química	Abreviatura	Parcela (%)
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	54,1
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	16,6
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	10,8
Ferro aluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	9,1

Fonte: Neville, 2016.

Tabela 3. Limites usuais da composição do cimento Portland

Óxido	Parcela (%)
CaO	60 - 67
SiO ₂	17 - 25
Al ₂ O ₃	3 - 8
Fe ₂ O ₃	0,5 – 6,0
MgO	0,5 – 4,0
Álcalis (como Na ₂ O)	0,3 – 1,2
SO ₃	2,0 – 3,5

Fonte: Neville, 2016.

3.3.2 ADIÇÕES E SUAS FUNÇÕES

As adições minerais foram desenvolvidas inicialmente com o objetivo principal de reduzir o consumo de energia e a distância de transportes de matérias-primas, contribuindo assim, com a menor geração de poluentes. Porém, com o passar do tempo e com novos estudos na área, materiais foram sendo desenvolvidos com intuito de melhorar as propriedades do cimento, tanto em sua reatividade química quanto na resistência mecânica. Cada tipo de cimento que se deseja obter dependerá da quantidade e do tipo de adição mineral que será considerado em sua composição (Molin, 2011). De acordo com Bataggin (2011), essas adições denominadas escórias granuladas de alto forno, filler calcário e materiais pozolânicos também trazem outros benefícios, sendo intermediadores entre os produtos de hidratação, aumentando a resistência do cimento, diminuindo sua porosidade, ou deixando o produto final mais trabalhável.

Alguns tipos de adições minerais como cinza volante, sílica ativa e escória granulada de alto-forno são utilizados como materiais cimentícios suplementares, e alteram significativamente a microestrutura da matriz de cimento devido aos efeitos pozolânico e de microfíler que apresentam. Esses materiais mostram influência na resistividade elétrica do concreto, pois provocam o refinamento da estrutura dos poros da matriz e, especificamente, no caso dos materiais pozolânicos, diminuem a concentração iônica da solução. Assim, a utilização desses materiais conduz a um

aumento da resistividade do concreto em relação ao concreto convencional (Detwiller e Metha, 1989; AITCIN, 2000).

A gipsita, sulfato de cálcio hidratado, é conhecida como gesso, e é inserida no cimento na moagem final e tem como objetivo e finalidade regular o tempo de pega, fazendo com que o cimento possa permanecer trabalhável por aproximadamente 90 minutos, conforme menciona a Associação Brasileira de Normas Técnicas. Caso o cimento não tenha o gesso em sua composição, seu início de pega iniciará em aproximadamente 15 minutos, tornando, assim, difícil a utilização do mesmo.

No caso do filler calcário, a adição de calcário finamente moído é feita com o intuito de diminuir a quantidade de vazios, melhorando a trabalhabilidade e o acabamento, podendo até elevar a resistência inicial do cimento (Itambé, 2017).

A pozolana, que é a cinza resultante da queima do carvão mineral, é um composto que possui sílica reativa, que quando finamente moída e em contato com cal atua como ligante hidráulico, confere ao cimento uma maior impermeabilidade, possibilitando a sua aplicação e melhorando o seu desempenho em ambientes úmidos e subterrâneos.

3.4 CIMENTO PORTLAND. PROCESSO DE PRODUÇÃO

Segundo Itambé (2017), o processo de produção do cimento segue algumas etapas. Primeiramente, é feita a extração das matérias-primas nas pedreiras de rochas calcárias e lavras de argila, sendo obtidas por meio de explosivos e com processos mecânicos respectivamente. Em seguida, esses materiais são transportados até o local do britador.

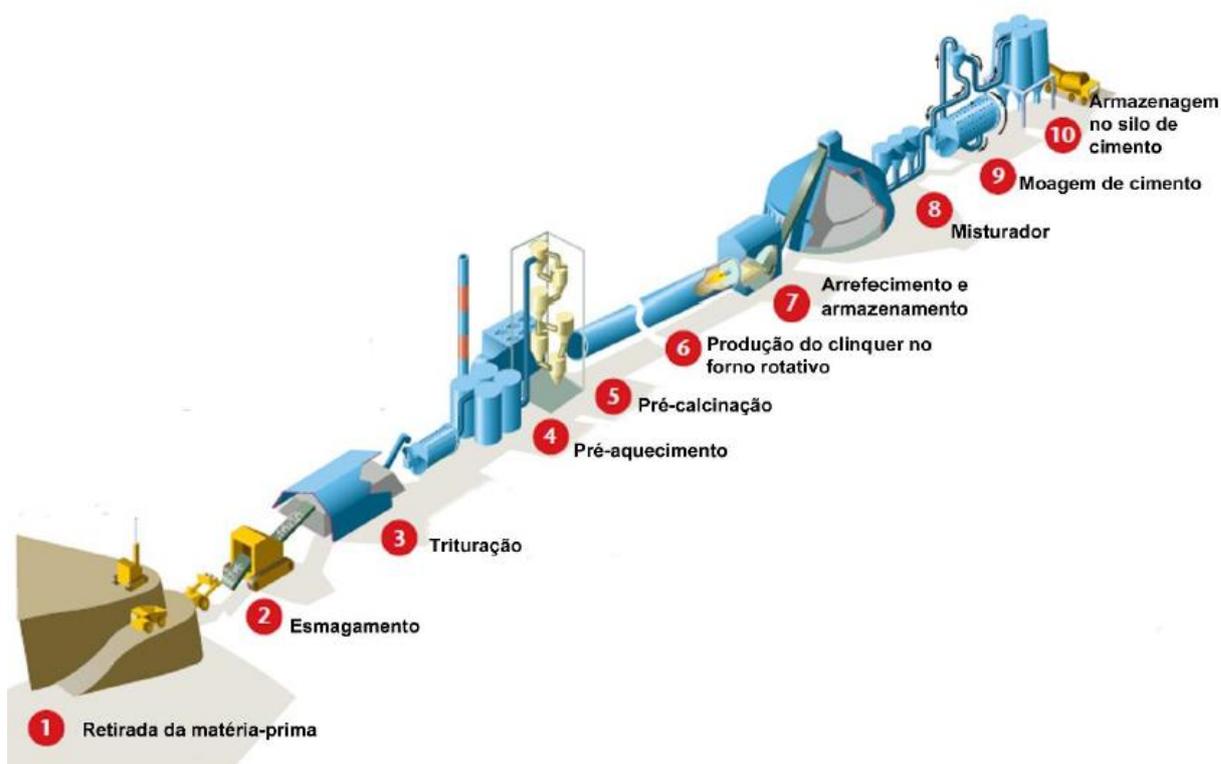
Posteriormente, os grandes blocos de pedra fragmentada obtidos por explosão são submetidos ao processo de britagem, sendo reduzidos a fragmentos menores ou iguais a 25 mm. Para melhorar a qualidade do clínquer, o calcário pode ser complementado com filito (material argiloso), que aporta alumina, Al_2O_3 , à mistura; quartzito (material arenoso), que aporta sílica, SiO_2 ; e minério de ferro, que aporta Fe_2O_3 .

Estes materiais são enviados para moagem em moinho vertical de rolos, em proporções pré-determinadas, onde se processa o início da mistura íntima, secagem e a homogeneização necessária, formando-se a farinha crua.

A farinha crua moída é queimada (calcificada) até que seja alcançada a fusão incipiente, em temperatura próxima a 1450 °C em um forno rotativo, com a mistura composta basicamente de sílica, alumina, ferro e cal. Estas reagem no interior do forno, resultando no clínquer.

Para se obter o cimento Portland desejado, é feita então a moagem do clínquer com diferentes adições, como o gesso (até 5 %), calcário, pozolana e escória. Deve-se certificar ao produto a finura e homogeneidade apropriadas, de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas. O processo de moagem do clínquer e suas adições influenciará em algumas características do cimento, como a hidratação e as resistências iniciais e finais. Na Figura 1 pode-se observar o processo de fabricação do cimento (WBCSD, 2009).

Figura 1. Processo de fabricação do cimento



Fonte: WBCSD, 2009, pág. 4.

4 CONCRETO E SUAS PROPRIEDADES

Com relação às propriedades que são desejadas no concreto fresco, procura-se aquelas que possibilitam uma mistura de fácil transporte, lançamento, adensamento e que não haja segregação. Portanto, devem ser levadas em consideração sua consistência, plasticidade, exsudação e boa trabalhabilidade, sendo estas, suas principais propriedades no estado fresco, além da hidratação do cimento que tem seu início no estado fresco e continua no estado endurecido.

Em seu estado endurecido, o concreto deve possuir propriedades como: durabilidade e resistência mecânica (Araújo; Rodrigues; Freitas, 2000).

4.1 ESTADO FRESCO. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

O cimento Portland resulta em um material aglomerante devido às reações que acontecem na pasta de cimento, que é composta por cimento e água. Ou seja, os silicatos e aluminatos, após o contato com a água, formam produtos hidratados, e com o passar do tempo, resultarão em uma mistura firme e resistente, conhecida também por massa ou pasta de cimento hidratada.

A hidratação do cimento e sua evolução pode ser verificada de diferentes formas como: quantidade de Ca(OH)_2 na pasta; calor de hidratação liberado; massa específica da pasta; quantidade de água quimicamente combinada; total de cimento anidro (com o ensaio de difração de raios X), e a microestrutura da pasta também pode ser analisada com o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Porém, mesmo com o passar do tempo, partículas anidras podem ser encontradas na massa cimentícia (Neville, 2016).

4.2 ESTADO FRESCO. CONSISTÊNCIA

Conforme informa Araújo, Rodrigues, Freitas (2000), a consistência é o grau de fluidez da mistura do concreto fresco, ou seja, está relacionada com a mobilidade da pasta de cimento (mistura de cimento e água). Um dos principais fatores que influenciam na consistência é o teor de água em relação aos materiais secos. Quanto mais plástica for a consistência do concreto, maior a facilidade de moldagem e deslizamento do concreto entre a ferragem no interior do elemento, evitando a separação dos seus componentes. O nível de consistência (alta ou baixa) deve ser baseado no

espaçamento entre as paredes das formas, natureza da obra e a distribuição da ferragem no seu interior. O processo que determina a consistência no Brasil é chamado de *slump test*, que tem como base a ABNT NBR 16889:2020 Concreto. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

4.3 ESTADO FRESCO. PLASTICIDADE

A facilidade com que o concreto pode ser moldado sem que haja seu rompimento é chamada de plasticidade. Essa propriedade depende da consistência e do grau de coesão entre os componentes do concreto. Caso não haja coesão, poderá ocorrer a segregação da mistura, que é definida como a separação dos grãos do agregado da pasta de cimento. Essa separação pode ocorrer em várias fases do concreto, como no transporte, durante o lançamento, durante o adensamento ou ainda pela ação da gravidade que provoca o assentamento dos grãos mais pesados no fundo das formas, ficando os demais espalhados pela pasta de cimento. A quantidade de agregados miúdos é significativamente importante na plasticidade devido a maior área específica. A utilização de areia em excesso aumenta excessivamente a coesão da mistura, o que dificultará o lançamento e adensamento do concreto nas formas, aumentando também o consumo de cimento e seu custo final (Araújo; Rodrigues; Freitas, 2000).

4.4 ESTADO FRESCO. EXSUDAÇÃO

É conhecida como o fenômeno que deve sempre ser evitado no concreto, caracterizando-se pela separação da água dos demais componentes do concreto e pela subida desta água até a superfície da peça concretada. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), este fenômeno acontece quando, no processo de lançamento do concreto nas formas, a parte sólida não é capaz de reter a água de amassamento. Ocorre geralmente em concretos com pequena porcentagem de finos, resultando em um concreto muito poroso e menos resistente.

A exsudação é uma forma de separação do material, onde uma porção da água da mistura se desloca à superfície do concreto previamente lançado. O fato ocorre devido à falta de capacidade dos materiais sólidos em reter a água de

amassamento quando a mesma se desloca ao fundo da mistura. Nem sempre a exsudação prejudica o concreto, a relação água/cimento efetiva poderá ser diminuída, aumentando assim a resistência à compressão, caso essa exsudação não seja perturbada e a água evaporar. Caso contrário, se essa água deslocada à superfície levar consigo uma quantidade considerável de partículas finas do cimento, formará uma camada de nata (água + cimento), resultando em uma superfície porosa enfraquecida, em se tratando de um elemento como laje, por exemplo, dificultando o acabamento e originando pó (Neville, Brooks, 2013).

4.5 ESTADO FRESCO. TRABALHABILIDADE

Considera-se um concreto trabalhável quando este concreto, no estado fresco, apresenta dimensões máximas dos agregados e consistência apropriadas ao tipo de obra a que se destina, levando em consideração as dimensões das peças, afastamento e distribuição das ferragens, métodos de transporte e lançamento, e ainda o adensamento que serão adotados. A trabalhabilidade tem relevância principalmente nas condições do local da aplicação do concreto, ou seja, um concreto trabalhável para peças de grandes dimensões e pouco armado pode não ser trabalhável no caso de peças delgadas e com muita ferragem (Mehta e Monteiro, 2014).

Essa propriedade pode ser definida como a quantidade de trabalho interno útil imprescindível à obtenção do adensamento total. O trabalho interno útil é uma propriedade física inerente do concreto sendo dado como o resultado da energia exigida para que se possa cobrir o atrito interno que há entre partículas singulares do concreto.

4.6 ESTADO ENDURECIDO. DURABILIDADE

A durabilidade dos materiais está ligada à sua capacidade de se conservar em determinado estado, fornecendo a mesma qualidade ao longo de um determinado tempo. Portanto, é a resistência de um material ou elemento da construção à deterioração ou degradação. Este conceito é relacionado ao do desempenho de um

produto em serviço, sob condições de real funcionamento ou uso, com pleno atendimento às exigências do usuário (ISAIA, 2001).

4.7 ESTADO ENDURECIDO. RESISTÊNCIA MECÂNICA

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a propriedade de resistência do concreto pode ser definida como sua capacidade de resistir a um determinado esforço de tensão sem que haja sua ruptura. No concreto considera-se a resistência à compressão axial uma das propriedades com maior relevância para os engenheiros e projetistas de estruturas, devido ao fato de que esta propriedade é relacionada à qualidade do concreto em geral, sendo possível, deste modo, correlacionar a qualidade do concreto com a sua resistência à compressão.

Neville (2016) menciona que a resistência do concreto é comumente considerada a propriedade mais importante. No entanto, em várias situações, outras características serão mais relevantes, como a permeabilidade e a durabilidade. Porém, a resistência acarreta numa visão mais próxima da qualidade do concreto, devido a ela estar devidamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento hidratada.

A idade de 28 dias foi adotada para que seja obtido o valor da resistência característica à compressão do concreto, porém, não há nenhuma explicação científica do motivo de ser adotada essa idade. Sendo assim, especula-se que esta idade ficou definida devido à lenta evolução da resistência do concreto somada à necessidade de obter a resistência com o cimento já hidratado. Ademais, há uma outra explicação que menciona o fato de ser uma idade múltipla de uma semana, ou seja, o vigésimo oitavo dia coincidiria com o dia da semana da concretagem, portanto dia útil com dia útil (Neville e Brooks, 2013).

O ensaio de resistência à compressão axial na pasta de cimento não é recomendado devido à grande dificuldade de moldagem das amostras e execução dos ensaios, apresentando resultados com grande variabilidade entre mesmos corpos-de-prova. Uma argamassa com cimento e areia, ou um concreto com formulações normalizadas, produzidos com materiais específicos e condições controladas, são utilizadas para determinar a resistência do cimento. A resistência

mecânica da pasta depende da coesão de seus constituintes, de sua aderência às partículas de agregados, e até certo ponto, a resistência mecânica dos próprios agregados (Neville, 2016).

A resistência está diretamente ligada com a permeabilidade, tendo em vista que os mesmos fatores influenciam tanto uma quanto a outra. Deve-se levar em consideração diversos cuidados quanto à moldagem de um concreto, desde a escolha do seu fator a/c, dimensão dos agregados, processo de cura, entre outros, para que se consiga um concreto com a menor porosidade possível, resultando em melhor resistência e baixa permeabilidade (MEDEIROS et al, 2011).

5 AGREGADOS

Segundo a ABNT NBR 7211 (2019), o agregado para concreto deve ser composto por grãos de minerais duros, compactos, duráveis, estáveis, limpos e que não interfiram no endurecimento e hidratação do cimento e também na proteção contra corrosão da armadura. Esta norma menciona, também, as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e graúdos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas, definindo assim areia ou agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante da britagem de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujas partículas passam pela peneira ABNT de 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 0,075 mm. Define ainda agregado graúdo como pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos fragmentos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 4,8 mm.

Segundo Neto (2011), a princípio, os agregados no concreto tinham função apenas de enchimento, ocupando um espaço de 70 a 80 % do volume do concreto convencional com intuito de diminuir o custo final da produção do concreto. Contudo, com o passar do tempo, descobriu-se que a relação do agregado ao concreto tinha outra importância que dizia respeito também à reação álcali-agregado, a qual influencia diretamente na durabilidade do concreto endurecido.

Bauer (2011) menciona que agregado é um material particulado ou granular, incoesivo, geralmente inerte, ou seja, sem reação química, e constituído de

partículas de variadas dimensões, sendo assim, adequadas para preparação de argamassa ou concreto.

Uma importante medida da consistência do concreto é a trabalhabilidade, e esta é suscetível à influência de determinados fatores, como: quantidade de água, teor de cimento, granulometria dos agregados e outras características físicas, aditivos e ainda, fatores que afetam a perda de abatimento. Após obter o teor de água e outras proporções da mistura, determina-se a trabalhabilidade pelo tamanho máximo do agregado, sua granulometria, forma e textura. Quanto maior a relação água/cimento, mais fina será a granulometria necessária para uma maior trabalhabilidade. O tamanho das partículas dos agregados, em especial, dos agregados miúdos, influencia de forma efetiva na obtenção de uma determinada consistência do concreto (NEVILLE, 2016).

Apesar da definição do que são os agregados no concreto, este trabalho foi desenvolvido com a pasta dos cimentos CPIV e CPV, visando determinar a condutividade elétrica inerente destas pastas, sem o efeito dos agregados.

6 RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO CONCRETO

A resistividade ou a condutividade elétrica no concreto são necessárias em alguns casos específicos na engenharia, como na aplicação nos dormentes de ferrovia, pois sua resistividade afeta vários sistemas de sinalização, ou em casos nos quais o concreto é utilizado em estruturas para proteção de correntes de fuga. Há influência também no progresso da corrosão das armaduras em se tratando de concreto armado (Neville, 2016).

Segundo Monfore (1968), a condução da corrente elétrica através do concreto é de natureza essencialmente eletrolítica e ocorre por meio dos íons presentes na água evaporável das pastas de cimento. Outro possível caminho para corrente elétrica é por meio dos próprios compostos e produtos hidratados do cimento (C-S-H, água adsorvida ao C-S-H, e partículas não-hidratadas de cimento) (Whittington, 1981).

McCarter (1997) afirmou que a condutividade elétrica deverá ocorrer através dos poros capilares preenchidos por água e pelas microfissuras da matriz. Segundo Polder (2001) e Whiting & Nagi (2003), a resistividade elétrica do concreto

depende da microestrutura da matriz de cimento, da concentração e da mobilidade dos íons presentes na solução aquosa da estrutura dos poros, do volume e da distribuição do tamanho dos poros. Devido aos fatores citados, e das condições de saturação do concreto ao ser analisado, a resistividade elétrica pode apresentar resultados que variem de 10 e $10^5 \Omega.m$.

Monfore (1968) fez medições em relação à resistividade elétrica de vários agregados comumente utilizados em concreto e encontrou resultados mais elevados em comparação à resistividade da pasta de cimento: $880.000 \Omega.cm$, no caso de agregados graníticos. Portanto, a resistividade do concreto é muito mais sensível às alterações das características da pasta de cimento do que às mudanças no tipo de agregado. Contudo, devido ao aumento da quantidade do agregado utilizado, a resistividade também aumenta.

Hughes (1985) afirma que, com a redução do consumo de cimento, a resistividade elétrica do concreto aumenta. Porém, os estudos desenvolvidos pelo mesmo, apresentaram pequena influência do consumo de cimento em concretos com baixa relação A/C.

Polder (2001) obteve resultados em que a resistividade elétrica de concretos produzidos com cimento com adição de escória de alto-forno ou por adição de cinza volante e sílica ativa foram superiores aos resultados apresentados pelas misturas de referência. Nas condições saturadas a resistividade dos concretos com adições variou entre 300 e $1000 \Omega.m$, enquanto os concretos de referência apresentaram valores de resistividade elétrica entre 50 e $200 \Omega.m$.

Autores como Castellote (2002) levam em consideração o efeito da temperatura, afirmando que, como a resistividade é o inverso da condutividade, então ela depende da temperatura, sendo que seu efeito na resistividade de um material sólido e poroso como o concreto abrange a mobilidade dos íons e as suas interações com as fases sólidas.

Andrade (2004) cita que a elevação da temperatura diminui a resistividade elétrica devido ao aumento da mobilidade iônica na água presente nos poros, ou seja, aumenta a sua condutividade elétrica. Contudo, pode resultar no efeito inverso e produzir o aumento da resistividade caso haja a evaporação da água livre do concreto.

Woelf e Lauer (1979 apud LENCIONI, 2011) fizeram uma verificação levando em consideração o fator água/cimento, após produzidos três concretos com

fatores a/c 0,40, 0,50 e 0,60. Concluíram que a propriedade da resistência elétrica do concreto está devidamente relacionada à quantidade de água utilizada na mistura.

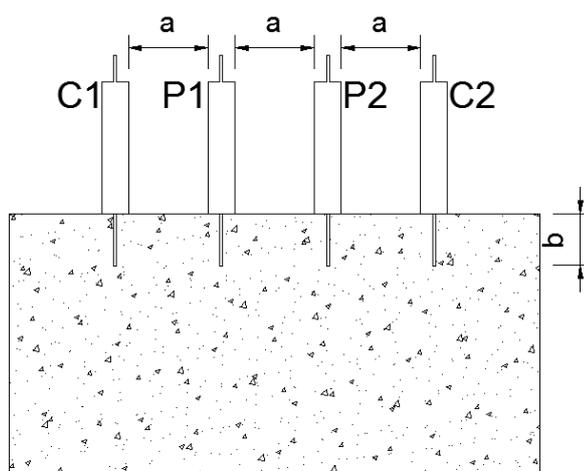
Há considerável influência na estrutura do concreto devido ao fator água/cimento, pois o volume total de poros contidos na mistura será maior ou menor conforme for o fator. Quanto menos poros existirem na mistura, menor será a conexão entre eles, levando ao aumento da resistividade do concreto (SANTOS, 2006).

Chao Lung et al (2011) observaram que, após adição de casca de arroz à massa de concreto, houve uma redução na quantidade de poros, melhorando a impermeabilização do concreto devido à reação pozolânica do insumo, aumentando dessa forma a resistividade elétrica.

6.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO CONCRETO. MEDIÇÃO

Segundo Lencioni (2011), o método Wenner, ou método dos quatro pontos é uma das técnicas mais usadas para se determinar a resistividade elétrica superficial do concreto. Foi desenvolvida com propósito inicial de se determinar a resistividade elétrica do solo. Porém, posteriormente foi adaptada por Wenner para o uso em concretos. Este ensaio consiste em submeter o corpo-de-prova, através dos eletrodos mais externos, à passagem de uma corrente elétrica de forma alternada, de onda senoidal de frequência de 10 Hz, posicionada de forma que a diferença de potencial entre esses eletrodos seja de 5 V. Após um período de tempo determinado, são realizadas duas medidas da diferença de potencial entre os eletrodos internos e duas leituras da corrente elétrica passante entre os eletrodos externos do corpo-de-prova. Na Figura 2 é ilustrado o método.

Figura 2. Disposição dos eletrodos no concreto, segundo método de Wenner



Fonte: Do autor

Neste arranjo os eletrodos são igualmente espaçados, como mostrado na Figura 2, sendo C1 e C2 os eletrodos de corrente, e a tensão é medida entre os eletrodos P1 e P2 do arranjo. Sendo “a” a distância entre eletrodos adjacentes e “b” a profundidade de cravação destes. Na prática, são usados quatro eletrodos localizados em uma linha reta em intervalos “a”, enterrados a uma profundidade que não exceda 10 % de “a”. Quando $b \leq a / 10$, então, a resistividade será calculada pela equação:

$$\rho = 2\pi a * \frac{V}{I}$$

ρ = Resistividade elétrica do concreto ($\Omega.m$);

a = Distância média entre os eixos dos eletrodos (m);

V = Diferença de potencial entre os eletrodos internos (V);

I = Corrente elétrica (A).

O método de medição dos quatro pontos é um ensaio que segue o procedimento da ABNT NBR 7117 (2012). Porém, não é normalizado no Brasil para medição em concreto, sendo utilizado para medição de resistividade em solo e adaptado para medições em concreto.

Hoppe (2005) menciona que, embora o método e o cálculo sejam simples, deverá ser dada atenção na aplicação desse método, devido às influências que poderão ocorrer devidas a fatores externos como: Geometria dos corpos-de-prova,

superfície de contato entre o concreto e os eletrodos, heterogeneidade do concreto, presença de armaduras, tipo de onda, frequência e intensidade da corrente aplicada.

6.2 CONCRETO CONDUTIVO

O concreto condutivo contém uma certa quantidade de componentes eletricamente condutivos na matriz do concreto para atingir estabilidade e relativamente alta condutividade elétrica. No estudo de Tuan (2004) foi utilizada uma mistura que continha fibras de aço e produtos de carbono para materiais condutores, contendo 1,5% de fibras de aço e produtos de carbono de diferentes tamanhos de partículas totalizando 25% por volume do concreto condutor. Devido à sua resistência e impedância elétrica, uma fina camada de concreto condutivo pode gerar calor suficiente para impedir a formação de gelo quando conectado a uma fonte de energia.

Tuan (2008) obteve aplicou um concreto condutor de corrente elétrica, onde foi aplicado a estrutura da Ponte Roca em Nebraska (EUA), obtendo uma resistência à compressão axial na mistura que variou de 41 a 55 MPa e gerou uma temperatura na laje da ponte em 9 °C acima da temperatura ambiente.

Soliman, Chanut, Deman, Lallas e Josef (2020), pesquisadores dos EUA e da França, desenvolveram um concreto a base de nano carbono que conduz corrente elétrica e conseqüentemente produz calor, permitindo que esse concreto seja aproveitado em aplicações como auto aquecimento de edifícios e até armazenamento de energia. A técnica se baseia em introduzir controladamente nano carbono no cimento, esse tipo de nano carbono tem origem a partir do negro de fumo, material barato e de excelente condutividade. O aquecimento resistivo resultante nesse cimento é causado pelas interações entre os elétrons e átomos em movimento no condutor, ou seja, os elétrons são acelerados no campo elétrico e trocam energia cinética cada vez que colidem com um átomo, induzindo a vibração dos átomos na rede, que se manifesta como calor e aumento da temperatura do material.

Na execução dos ensaios e testes, descobriram que mesmo uma pequena tensão gerada por esse material menor que 5 V, era suficiente para aumentar as temperaturas da superfície de suas amostras (aproximadamente 5 cm) até 41°C. Embora um aquecedor de água padrão possa atingir temperaturas comparáveis, é importante considerar como esse material seria implementado em comparação com

as estratégias de aquecimento convencionais. Esse material resultou em um produto ideal para aquecimento de piso interno, o que hoje se conhece como pisos radiantes, e normalmente é feito pelo aquecimento da água em tubulações, onde são instaladas embaixo do piso no ambiente, obtendo a vantagem de ter estruturas menos espessas, conseqüentemente estruturas mais leves e mais baratas economicamente, além do que, o cimento pode oferecer uma distribuição de calor mais homogênea devido a dispersão do nano carbono no material.

Este cimento gerado a partir do nanocarbono pode ter várias aplicações em áreas externas, como na implementação de pavimentos de concreto. O cimento de nanocarbono pode diminuir as preocupações com durabilidade, sustentabilidade e segurança, pois muitos problemas são gerados quando se utiliza sal para o degelo destes pavimentos. Na Europa e América do Norte, há muita neve, e para remover essa neve, utilizam sais para degelo que danificam o concreto pela sua agressividade química e contaminam o lençol freático, sendo que, ainda há o fator das máquinas pesadas que são utilizadas nessa remoção. O concreto com nano carbono, pode ser utilizado nesses casos para descongelar os pavimentos. Segundo a especificação técnica do poste auto aterrado da CPFL (2019), o concreto é condutivo quando os agregados de alta resistividade elétrica como areias e britas, são substituídos por agregados de baixa resistividade elétrica, conseqüentemente, aumentando sua condutividade elétrica em qualquer condição de umidade.

O trabalho da CPFL (2019) menciona que para postes auto aterrados, deve ser utilizada massa condutiva com a mesma resistência à compressão definida para o concreto utilizado na fabricação do corpo do poste e composta por: Cimento CPV ARI, areia média, coque metalúrgico fino, sílica ativa e aditivo plastificante ou superplastificante, sendo que o carvão coque deverá ter sua granulometria conforme peneira de 80 mesh, e o abatimento tronco cone da mistura deve estar entre 20 e 100 mm.

6.3 GRAFITE

Segundo a empresa Nacional do Grafite (2014), o grafite é a forma mais pura do carbono, podendo ser citado como o melhor condutor térmico e elétrico entre os elementos não metálicos, sendo considerado um mineral macio, que possui

flexibilidade, alto poder refratário e quimicamente inerte. Essas propriedades combinadas fazem com que o grafite seja amplamente utilizado em diversas aplicações nas indústrias.

Lobato (2009) e Marinho (2014) definem o grafite como um elemento que possui características de resistência a elevadas temperaturas, alta condutividade térmica e elétrica, e flexibilidade. Islam, Rojas, Bergey e Johnson (2003) afirmam que o grafite é um excelente condutor de calor e eletricidade, possui resistência a agentes químicos, apresenta boa maleabilidade, possui características refratária desde que a atmosfera se apresente inerte, é biocompatível, e possui ponto de fusão de aproximadamente 3650 °C.

Santos (2013) menciona que, em relação aos vários tipos conhecidos de adições de concreto contendo carbono, existem algumas estruturas que partem do grafite e que possuem características superiores a este mineral, podendo citar, os nanotubos de carbono e o grafeno.

7 MATERIAIS E MÉTODOS

Na escolha dos materiais para produção da pasta de cimento, levou-se em consideração os mais comuns e disponíveis na região de Criciúma, SC, sendo eles os cimentos CPIV (pozolânico), e o cimento CPV ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), adicionando o ferro em pó e o grafite em pó para melhorar a condutividade elétrica. A água utilizada foi da rede de abastecimento.

7.1 CIMENTO CPIV

O cimento Portland pozolânico tem baixo calor de hidratação, o que o torna bastante recomendável na concretagem de grandes volumes e sob temperaturas elevadas. Além disso, o alto teor de pozolana, entre 15 e 50%, proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. É altamente eficiente em argamassas de assentamento e revestimento, em concreto magro, concreto armado, concreto para pavimentos e solo-cimento. Na Tabela 4 podem ser observados os teores limites de adições que esse cimento pode apresentar.

Tabela 4. Especificações de norma para os ensaios físicos do CPIV

CPIV	Especificações da ABNT (%)
Ensaio físico	
Clínquer + sulfatos de cálcio	45 - 85
Escória granulada de alto forno	-
Material pozolânico	15 - 50
Material carbonático	0 - 10

Fonte. ABNT NBR 16697:2018.

7.2 CIMENTO CPV ARI (ALTA RESISTÊNCIA INICIAL)

O CPV ARI é um dos tipos de cimentos que não contém adições em sua composição (em casos excepcionais pode conter até 5% de material carbonático). O que o difere do CP I é seu processo de dosagem e produção do clínquer. As alterações nas dosagens de calcário e argila na produção do clínquer garantem ao CPV ARI

uma alta resistência inicial do concreto, podendo atingir em torno de 26 MPa de resistência já no primeiro dia de aplicação do concreto. É utilizado em obras tanto de pequeno porte quanto de grande porte em casos em que se torna necessária uma alta resistência inicial para desforma rápida dos elementos de concreto armado. A resistência à compressão aos 28 dias do CP V ARI é regida pela ABNT NBR 16697:2018, a qual não estabelece valor mínimo. A massa específica média do CP V ARI é $3,12 \text{ g/cm}^3$ (NBR 16605:2017). Na Tabela 5 são informados os limites dos teores que o CPV poderá apresentar em sua composição.

Tabela 5. Especificações de norma para os ensaios físicos do CP V ARI

CP V ARI	Especificações da ABNT (%)
Ensaio Físico	
Clínquer + sulfatos de cálcio	90 - 100
Escória granulada de alto forno	-
Material pozzolânico	-
Material carbonático	-

Fonte. ABNT NBR 16697:2018.

7.3 GRAFITE

Foi utilizado o grafite em pó da marca Vonder, com a composição e concentração apresentadas na Tabela 6. As propriedades físicas e químicas são mostradas na Tabela 7. Todas as informações foram obtidas diretamente com o fabricante Quimidrol.

Tabela 6. Composição e concentração do grafite em pó

Composição e Concentração (%)	
Adição: Grafite em pó	
Componente	Concentração
Grafite Natural	70,0 - 100
Quartzo	0,01 - 25,0

Fonte: Quimidrol, 2021

Tabela 7. Propriedades físicas e químicas do grafite em pó

Propriedades Físicas e Químicas	
Adição: Grafite em pó	
Aspecto (estado físico, forma, cor)	Sólido cinza escuro e com brilho metálico
Odor e limite de odor	Inodoro
Ponto de Fusão	Acima de 3.650 °C
Inflamabilidade	Não inflamável
Peso Específico	1,1 a 1,3 g/cm ³
Solubilidade	Insolúvel na água

Fonte: Quimidrol 2021

7.4 FERRO EM PÓ

O ferro em pó utilizado foi da marca NEON, e foi adicionado à mistura devido suas propriedades condutivas. Suas propriedades físico-químicas estão descritas na Tabela 8.

Tabela 8. Propriedades físicas e químicas do ferro em pó

Propriedades físicas e químicas	
Adição: pó de ferro	
Forma	Sólido
Cor	Cinzento
Odor	Inodoro
pH	7 – 9
Ponto de fusão	1.535 °C
Ponto de ebulição	3.000 °C
Temperatura de ignição	>100 °C
Densidade	7,87 g/cm ³
Densidade bruta	3.000-4.000 kg/m ³
Solubilidade em água	Insolúvel

Fonte: Quimidrol 2021

7.5 ÁGUA

Foi utilizada a água da rede de abastecimento. Segundo a NBR 15900-1:2009, em seu item 3.2, água de abastecimento público, menciona que esta água é considerada adequada e não necessita ser ensaiada.

7.6 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DA PASTA DE CIMENTO

A execução do ensaio para determinação da resistência do cimento no traço referência e com adição de grafite e pó de ferro seguiu a norma ABNT NBR 7215:2019 'Cimento Portland. Determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos'. Foram moldados 33 corpos-de-prova cilíndricos de 5 × 10 cm, sendo 3 para cada traço mostrado na Tabela 9. Foi utilizado um planejamento experimental tipo 2^k com 1 ponto central. Os fatores (k) foram o tipo de cimento (CP V ou CP IV), a adição de grafite (0 ou 5% em massa) e a adição de pó de ferro (0 ou 5% em massa). O ponto central (ensaio 9) correspondeu à mistura 50/50 dos cimentos CP IV e CP V, adição de 2,5% de grafite, e adição de 2,5% de pó de ferro, resultando em 9 ensaios.

Tabela 9. Composição das misturas para produção dos corpos-de-prova

Ensaio	Cimento	Quant. (g)	Grafite	Quant.(g)	Pó de Ferro	Quant.(g)	Água	Quant.(g)
1	IV	1100	0,0%	0	0,0%	0	0,45	495
2	IV	1100	0,0%	0	5,0%	55	0,45	495
3	IV	1100	5,0%	55	0,0%	0	0,45	495
4	IV	1100	5,0%	55	5,0%	55	0,45	495
5	V	1100	0,0%	0	0,0%	0	0,45	495
6	V	1100	0,0%	0	5,0%	55	0,45	495
7	V	1100	5,0%	55	0,0%	0	0,45	495
8	V	1100	5,0%	55	5,0%	55	0,45	495
9	IV+V	1100	2,5%	27,5	2,5%	27,5	0,45	495

Fonte: Do autor

Os materiais foram pesados em balança digital (Alfa modelo DGN) com capacidade de 5.000 g e precisão de 0,01g. Após pesados os materiais, iniciou-se a

mistura da seguinte forma: Foi colocada na cuba da argamassadeira (Fortest modelo 5TLTS) toda a quantidade de água e cimento, em velocidade de rotação baixa por aproximadamente 30 segundos. Após esse tempo foi adicionado o grafite, e misturada a pasta por mais 30 segundos. Em seguida, foi feito o mesmo processo com o pó de ferro. Ao fim dos últimos 30 segundos, a rotação da argamassadeira foi aumentada, misturando-se por mais 30 segundos. Após esse tempo, a argamassadeira foi desligada, permanecendo assim por 1 minuto e 30 segundos. Os primeiros 15 segundos foram utilizados para retirar o material que estava aderido às paredes da cuba e na própria pá do equipamento utilizando uma espátula. Este material foi colocado novamente no interior da cuba, no tempo restante, e a pasta ficou em repouso coberta com um pano úmido para que a mistura não perdesse água. Após o tempo em repouso, a argamassadeira foi ligada novamente em velocidade de rotação alta por 1 minuto, e em seguida, os moldes de PVC foram preenchidos.

Para que o ensaio de resistividade da pasta de cimento pudesse ser executado, nos moldes de PVC foram inseridos 4 fios de cobre de 4 mm de diâmetro com aproximadamente 5 cm de distância entre si para servirem de eletrodos.

Para a produção da pasta, foi utilizado e adaptado o procedimento conforme ABNT NBR 7215:2019, 'Determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos'. Houve adaptação, pois na norma mencionada utiliza-se areia padrão, e no estudo, foram utilizados somente os insumos que iriam na mistura, ou seja, cimento, grafite, pó de ferro e água, formando pastas, e não argamassas. No total foram moldadas 33 amostras, conforme Figura 3.

Figura 3. Amostras para ensaio da pasta



Fonte. Do autor

Após a moldagem, os corpos-de-prova permaneceram em superfície plana por aproximadamente 24 h. Após esse período, as amostras foram armazenadas em tanque com água e cal, com temperatura de 23°C para iniciar o processo de cura por 28 dias. Após este período, foram retiradas do tanque. A medição da resistividade elétrica foi realizada conforme item 7.7. O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado conforme item 7.8.

7.6.1 DETERMINAÇÃO DA PASTA ÓTIMA

Os resultados de resistividade elétrica e resistência à compressão axial das pastas de cimento (Tabela 9) foram avaliados estatisticamente pelo método da ANOVA, digrama de Pareto, gráficos de média e superfícies de resposta, utilizando o software Statistica 12 versão *Trial*. O objetivo foi analisar e avaliar a relação das variáveis de entrada, os fatores do estudo, e seus níveis nos resultados apresentados, e desta forma elencar a formulação com os melhores resultados, o que facilitaria na escolha da composição de um concreto condutivo.

7.7. DETERMINAÇÃO DA RESISTIVIDADE DAS PASTAS DE CIMENTO

Para o ensaio de resistividade do concreto foi utilizado o método de 4 pontos ou método de Wenner, que calcula a resistividade elétrica do solo. Este ensaio é normalizado pela ABNT NBR 7117:2012, lembrando que não é normalizado no Brasil para o uso em concretos, sendo adaptado para este uso.

Esse método é vantajoso devido ao fato de que os equipamentos podem ser utilizados *in loco* e por ser um método não destrutivo. O método de quatro pontos é composto de uma sonda com quatro eletrodos posicionados linearmente e com distâncias iguais entre si. Durante a passagem de uma corrente elétrica é formado um campo elétrico e os pontos receptores da sonda captam a diferença de potencial ocorrida no objeto, no caso, os corpos-de-prova de concreto. A resistividade elétrica é informada automaticamente pelo equipamento, lembrando que esse ensaio tem que ser feito com o concreto úmido.

Para realizar este ensaio, foram utilizadas as amostras moldadas conforme mencionado no item 7.7, sendo corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 25 cm de comprimento, seguindo a mesma quantidade e traços mencionados na Tabela 9.

Os ensaios foram realizados no laboratório da empresa Inovarum, com o auxílio de um terrômetro resistivímetro digital CAT III 600 V (Kyoritsu modelo 4106), mostrado na Figura 4.

Figura 4. Terrômetro resistivímetro digital



Fonte. Do autor

Todas as amostras foram submetidas ao ensaio, sendo obtidos resultados para resistividade elétrica (Ω), corrente elétrica (mA) e tensão (V). A configuração e execução do ensaio é mostrada na Figura 5.

Figura 5. Execução do ensaio de resistência elétrica das pastas



Fonte. Do autor

7.8 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS PASTAS DE CIMENTO

Para que sejam executados os ensaios de resistência à compressão axial das pastas de cimento, as bases dos corpos-de-prova devem ser retificadas ou capeadas. Sendo assim, foi utilizada uma retífica (Setor Ind modelo Full) para retificar os corpos-de-prova seguindo os procedimentos da ABNT NBR 5738:2015, garantindo assim a integridade estrutural das amostras, proporcionando uma superfície lisa e sem ondulações ou abaulamentos, condições que podem interferir no resultado final do ensaio.

Após o processo de retificação e remoção de todos os moldes de PVC, os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de compressão axial, seguindo a ABNT NBR 5739:2018. Inicialmente foi feita a medição dos diâmetros dos corpos-de-prova com exatidão de ± 1 mm, utilizando um paquímetro analógico de 600 mm (Digimess), e a altura de cada corpo-de-prova, utilizando o mesmo instrumento. Antes de iniciar cada ensaio, os corpos-de-prova foram centralizados no equipamento Rilen (Fortest

modelo Rilen 5x10). O equipamento serve para que não haja ruptura no corpo-de-prova por cisalhamento, tendo em vista que uma prensa hidráulica possui somente rótulas para corpos-de-prova de 10 x 20 cm e 15 x 30 cm.

A prensa hidráulica utilizada no ensaio foi da marca (Fortest) modelo (120 t). O ensaio de resistência à compressão axial deve ser executado continuamente e sem choques, sendo que a velocidade de carregamento do equipamento deve ser de $0,45 \text{ MPa} \pm 0,15 \text{ MPa}$, mantendo a velocidade no decorrer do ensaio.

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados e discutidos os resultados de resistência à compressão axial e resistividade das pastas de cimento utilizando grafite e pó de ferro.

8.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DA PASTA DE CIMENTO

Nesta seção são apresentados os resultados de resistência à compressão das formulações das pastas de cimento com adição de grafite e pó de ferro. A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para determinar o efeito do tipo de cimento e adição de grafite e pó de ferro sobre os valores de resistência à compressão uniaxial (MPa) medidos nos corpos-de-prova para cada formulação de pasta. Além da ANOVA, é apresentado o diagrama de Pareto indicando os fatores e/ou interações mais significativos, os gráficos de superfície de resposta para interações com significância, e a respectiva equação de regressão.

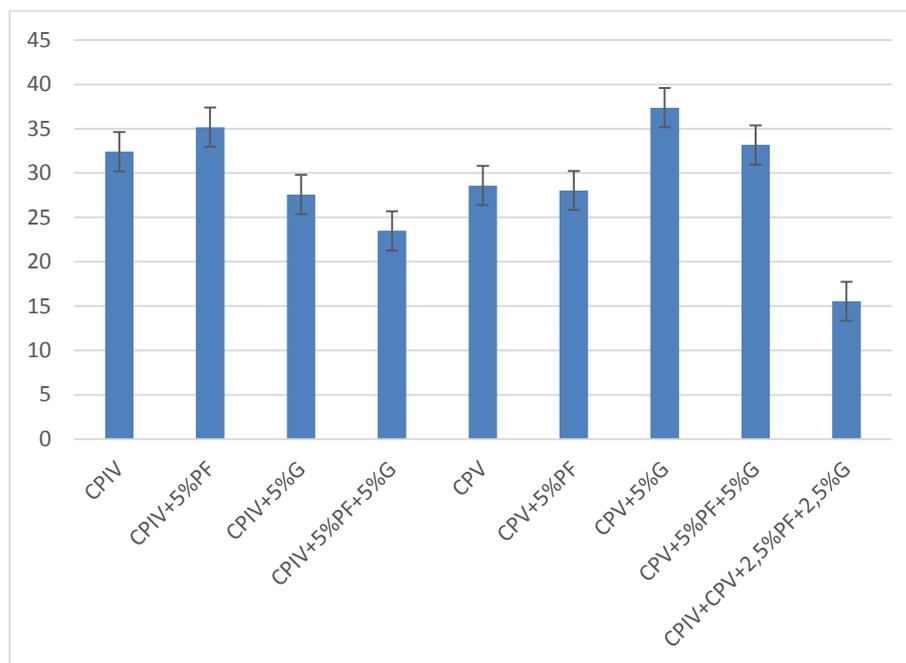
As formulações das pastas de cimento com adição de grafite e pó de ferro foram avaliadas quanto a sua resistência à compressão dos corpos-de-prova pelo método ABNT NBR 5739:2018, 'Ensaio de compressão de corpos cilíndricos', Tabela 10 e Figura 17.

Tabela 10. Resistência à compressão axial (MPa) das pastas

Formulação	Cimento	Grafite (%)	Pó de ferro (%)	Resist. 1 (MPa)	Resist. 2 (MPa)	Resist. 3 (MPa)	Média (MPa)
1	IV	0	0	32,42	27,83	41,71	32,42
2	IV	0	5	35,17	27,88	36,62	35,17
3	IV	5	0	27,58	31,72	26,98	27,58
4	IV	5	5	22,18	23,48	30,42	23,48
5	V	0	0	24,63	44,31	28,58	28,58
6	V	0	5	28,03	13,59	34,22	28,03
7	V	5	0	37,37	40,37	30,87	37,37
8	V	5	5	32,37	41,31	33,17	33,17
9	IV + V	2,5	2,5	15,74	8,89	15,54	15,54

Fonte. Do autor

Figura 6. Resistência à compressão axial (MPa) das pastas.



Fonte. Do autor

Para analisar o efeito da adição de grafite (0 e 5%) e pó de ferro (0 e 5%), e do tipo de cimento (CP IV e V) sobre a resistência à compressão axial (MPa) das pastas, foi realizada a análise de variância (ANOVA) dos resultados, Tabela 11. O coeficiente de determinação para a resistência à compressão das amostras foi de $R^2 = 0,98$, mostrando que o modelo utilizado é adequado aos dados experimentais.

Tabela 11. ANOVA para a resistência à compressão axial das pastas ($R^2 = 0,98$)

Fator	SS	df	MS	F	p
Curvatura	242,6	1	242,6	5,34	0,033
(1) Cimento	25,8	1	25,8	0,569	0,461
(2) Grafite	0,40	1	0,40	0,0088	0,9264
(3) Pó de ferro	53,7	1	53,7	1,182	0,291
1 × 2	276,8	1	276,8	6,091	0,024
1 × 3	5,13	1	5,13	0,113	0,741
2 × 3	5,90	1	5,90	0,130	0,723
1 × 2 × 3	32,4	1	32,4	0,714	0,409
Erro	817,9	18	45,4		
Total SS	1460,6	26			

Fonte. Do autor

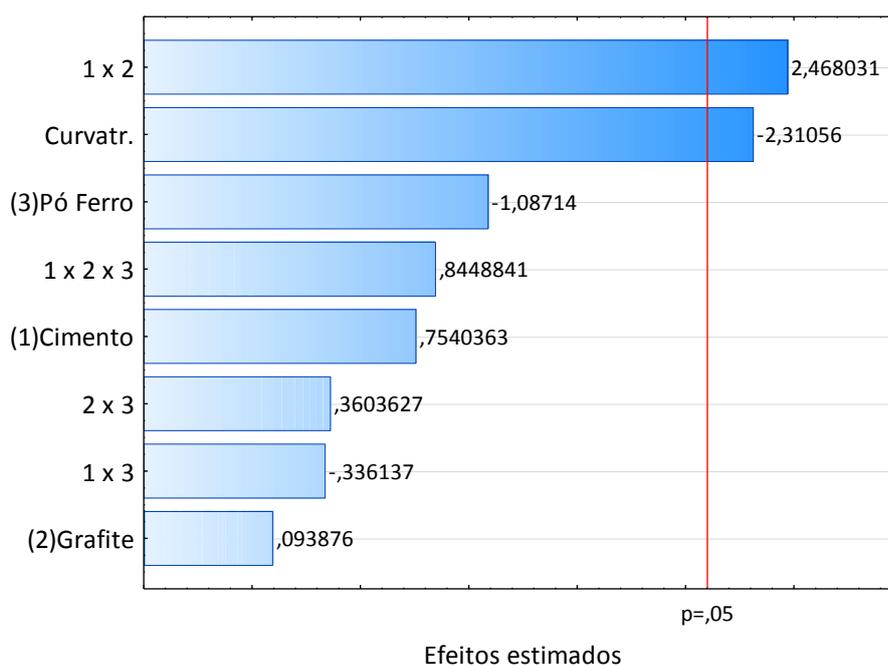
Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

A análise dos resultados da ANOVA para a resistência à compressão das pastas, Tabela 11, mostra que os fatores com significância estatística, dada pelo valor de p , foram a curvatura e a interação entre o tipo de cimento e a adição de grafite, todos com confiabilidade maior ou igual a 95%. Os demais fatores e suas interações não apresentaram significância estatística para a resistência à compressão das pastas ($p > 0,05$).

A curvatura apresentou significância estatística, indicando que a resistência à compressão não é linear quando os níveis do planejamento são alterados, ou seja, quando se altera o tipo de cimento ou a quantidade de grafite das amostras.

A análise do diagrama de Pareto para a resistência à compressão (Figura 7) mostra a interação entre o tipo de cimento e a adição de grafite, além do efeito da curvatura, com significância de 95% para os resultados obtidos. Pelo diagrama de Pareto, a interação entre o tipo de cimento e a grafite apresenta um resultado positivo, ou seja, esta interação aumenta a resistência à compressão das amostras. Ao contrário, a curvatura apresenta um resultado negativo, ou seja, diminui a resistência à compressão das amostras.

Figura 7. Diagrama de Pareto para a resistência à compressão (MPa) das pastas



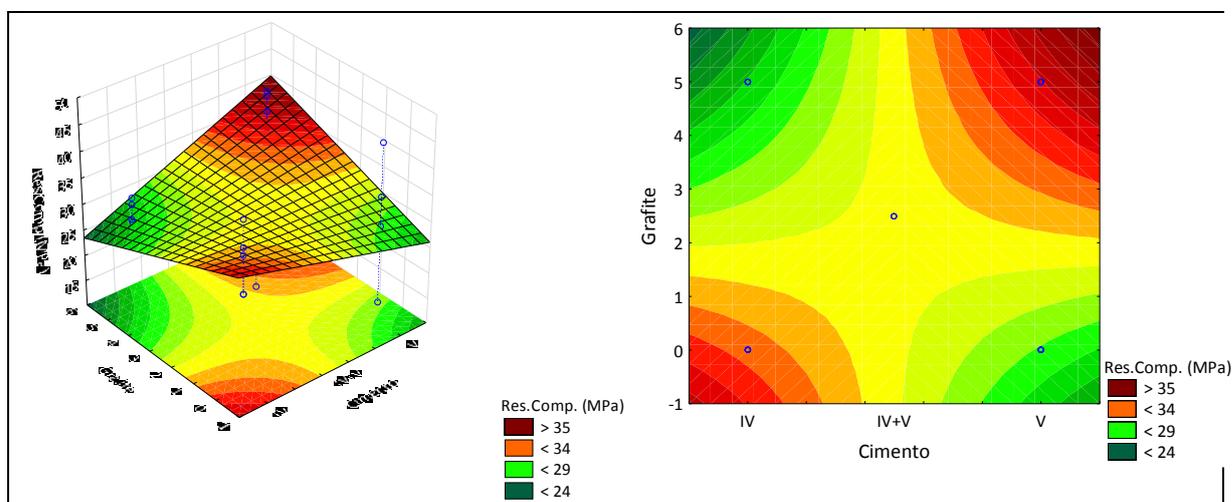
Fonte. Do autor

Como o fator significativo para a resistência à compressão axial foi a interação entre o tipo de cimento e adição de grafite, o efeito desta sobre a resistência é mostrado como uma superfície de resposta, Figura 8. Avaliando a resistência à compressão das pastas, o maior valor de resistência à compressão é obtido para duas condições da interação, cimento CP V com 5% de adição de grafite, ou cimento CP IV sem adição de grafite e com adição de pó de ferro, em típico efeito de sela. Os menores valores de resistência são obtidos para a combinação de cimento CP V sem adição de grafite e adição de 5% de pó de ferro ou para cimento CP IV sem adição de grafite e adição de 5% de pó de ferro.

Conforme observado, há uma variabilidade nos resultados de resistência à compressão axial dos corpos-de-prova. Neville (2016) menciona que os ensaios na pasta de cimento podem ter variação devido à dificuldade de moldagem e de ensaio nos corpos-de-prova, fazendo com que apresentem resultados muito dispersos. A coesão da pasta, bem como a interação da massa cimentícia com as partículas dos agregados, também podem influenciar na resistência a compressão axial. Neste caso, percebe-se que o grafite afetou o comportamento mecânico da pasta. Pelo seu tamanho de partícula, sendo aproximadamente 30% retido em mesh 100, ele não tem o efeito de um agregado, mas pode ter interferido na homogeneidade das pastas.

A baixa resistência à compressão é diretamente afetada por fatores como relação água cimento, má execução da moldagem do corpos-de-prova, processo de cura inadequado, resultando dessa forma em uma pasta porosa, diminuindo consequentemente sua resistência mecânica.

Figura 8. Superfície de resposta para a resistência à compressão (MPa) das pastas em função do tipo de cimento e da adição de grafite



Fonte. Do autor

Com a análise estatística pode-se obter o modelo de regressão para a variável de resposta em questão, a resistência à compressão, permitindo estimar um valor esperado para esta em função do comportamento dos fatores analisados que apresentam significância superior a 95% (curvatura, interação tipo de cimento \times adição de grafite). O modelo geral da equação de regressão e a equação para a resistência à compressão das pastas são mostrados nas equações Eq.1 e Eq.2, respectivamente.

$$\alpha = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \varepsilon \quad (\text{Eq.1})$$

onde:

α é a variável de resposta; β_0 é o valor médio; β_1 , β_2 são os coeficientes de regressão para cada fator; x_1 , x_2 são os fatores em estudo; ε é o erro experimental.

Desta forma, a equação de regressão para a resistência à compressão das pastas é (Eq.2):

$$R_{comp} \text{ (MPa)} = 31,4 - 9,5 \cdot x_{curvatura} + 3,4 \cdot x_{cimento} \cdot x_{grafite} + 1,4 \quad (\text{Eq.2})$$

8.2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DA PASTA DE CIMENTO

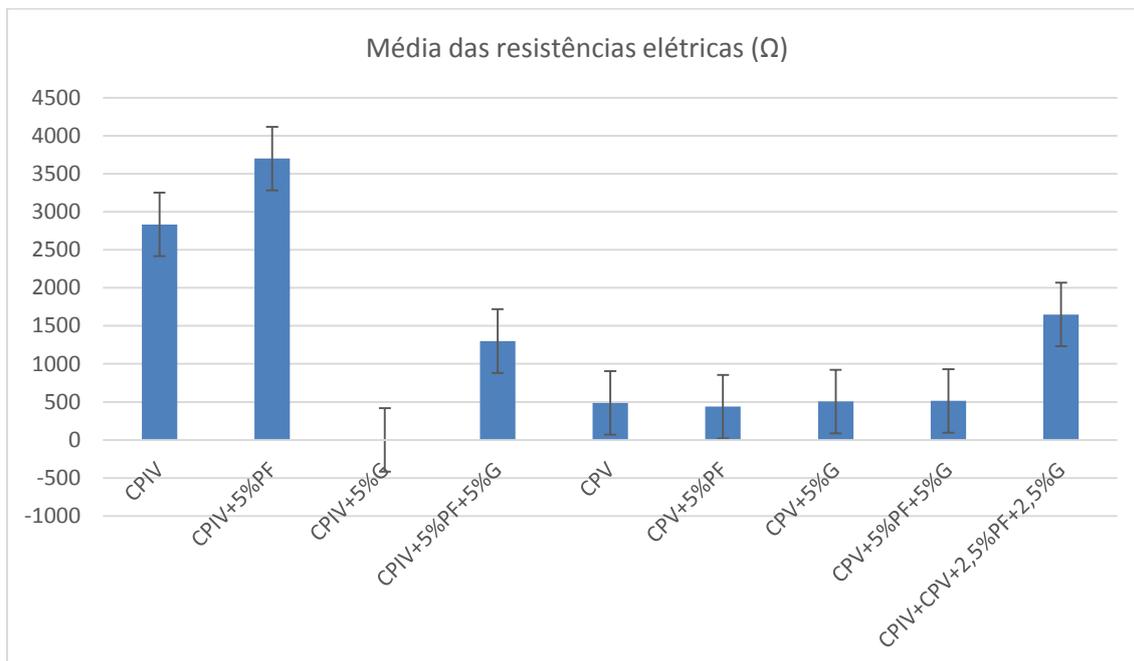
Nesta seção são apresentados os resultados de resistividade das formulações das pastas de cimento com adição de grafite e pó de ferro, determinados pelo método Wenner ou método dos 4 pontos. Análise de variância (ANOVA) foi utilizada para determinar o efeito do tipo de cimento e adição de grafite e pó de ferro sobre os valores de resistência (Ω), corrente (mA) e tensão (V) medidos nos corpos-de-prova para cada formulação de pasta. Além da ANOVA, para cada propriedade são apresentados os diagramas de Pareto indicando os fatores e/ou interações mais significativos, os gráficos de médias para fatores com significância, os gráficos de superfície de resposta para interações com significância, e as respectivas equações de regressão.

As formulações das pastas de cimento com adição de grafite e pó de ferro foram avaliadas quanto a sua resistividade pela medição da resistência (Ω) dos corpos-de-prova pelo método de Wenner ou métodos dos 4 pontos, Tabela 13 e Figura 9.

Tabela 12. Resistência (Ω) das pastas determinada pelo método Wenner

Formulação	Cimento	Grafite (%)	Pó de ferro (%)	Resist. 1 (Ω)	Resist. 2 (Ω)	Resist. 3 (Ω)	Média (Ω)
PC01	IV	0	0	-	4100	4400	2833
PC02	IV	0	5	4400	3200	3500	3700
PC03	IV	5	0	-	-	-	-
PC04	IV	5	5	3900	0	0	1300
PC05	V	0	0	446	478	534	486
PC06	V	0	5	426	453	436	438
PC07	V	5	0	528	482	506	505
PC08	V	5	5	505	524	511	513
PC09	IV + V	2,5	2,5	-	1700	1600	1650

Fonte. Do autor

Figura 9. Resistência elétrica (Ω) das pastas

Fonte. Do autor.

Para analisar o efeito da adição de grafite (0 e 5%) e pó de ferro (0 e 5%) e do tipo de cimento (CP IV e V) sobre a resistência (Ω) das pastas, foi realizada a análise de variância (ANOVA) dos resultados obtidos, Tabela 13. O modelo utilizado também representa adequadamente os dados experimentais. O coeficiente de determinação para a resistência elétrica das amostras é $R^2 = 0,98$.

Tabela 13. ANOVA para a resistência elétrica (Ω) das pastas ($R^2 = 0,98$)

Fator	SS	df	MS	F	p
Curvatura	646572	1	646572	10,0	0,007
(1) Cimento	28107743	1	28107743	436,0	0,000000000022
(2) Grafite	36654	1	36654	0,56	0,46
(3) Pó de ferro	278322	1	278322	4,3	0,05
1 \times 3	240922	1	240922	3,7	0,075
Erro	837912	13	64454		
Total SS	48294621	19			

Fonte. Do autor

Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

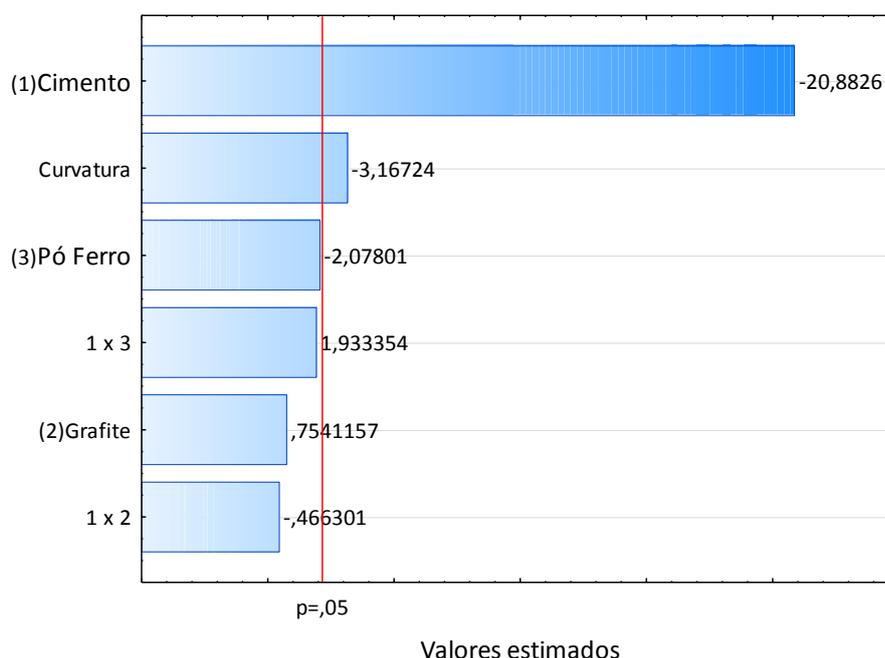
A análise dos resultados da ANOVA para a resistência elétrica das pastas, Tabela 13, mostra que os fatores com significância estatística, dada pelo valor de p,

foram a curvatura, o tipo de cimento, e a adição de pó de ferro, todos com confiabilidade maior ou igual a 95%. Os demais fatores e suas interações não apresentaram significância estatística para a resistência das pastas ($p > 0,05$).

Foi utilizado modelo de interação dupla, mas desconsiderando as interações entre o cimento e a grafite (1 x 2) e a grafite e o pó de ferro (2 x 3), devido à baixa significância ($p > 0,05$) do efeito da adição de grafite para a resistência ôhmica das amostras. A curvatura apresentou significância estatística, indicando que a resistência não é linear quando os níveis do planejamento são alterados, ou seja, quando se altera o tipo de cimento ou a quantidade de pó de ferro das amostras.

A análise do diagrama de Pareto para a resistência ôhmica (Figura 10) mostra o efeito do tipo de cimento, da curvatura, e da adição de pó de ferro (marginal) com significância de 95% para os resultados obtidos.

Figura 10. Diagrama de Pareto para a resistência elétrica (Ω) das pastas



Fonte. Do autor

Como os fatores significativos para a resistência ôhmica foram os fatores individuais, tipo de cimento e adição de pó de ferro, o efeito destes sobre a resistência é mostrado como gráficos de médias, Figura 11. Avaliando a resistência das pastas, pode-se observar que o cimento CPV ARI tem maior condutividade elétrica, levando em consideração que é um cimento mais puro, ou seja, não contém adições resistivas

como a pozolana contida no cimento CPIV. Também foi observado no momento da homogeneização da pasta que o pó de ferro não resultou em uma boa interação com a pasta, ou sejam água e cimento, como pode-se observar na Figura 11.

Era esperado que a adição de pó de ferro aumentasse a condutividade elétrica das pastas, ou seja, que apresentasse menor resistividade elétrica (ôhmica). Como a adição de pó de ferro foi um fator significativamente estatístico, a um nível de 95%, mas resultou em aumento de resistividade e não de condutividade. Uma possível explicação seria o pó de ferro não estar bem disperso na matriz da pasta, e assim ser um obstáculo à condutividade desta. Materiais com partículas finas como o cimento, tendem a aglomerar quando entram em contato com um fluido tão polar quanto a água, motivado pelas várias formas de interação, sendo: forças eletrostáticas entre posições de sítios com cargas opostas e forte interação, forças de atração interpartículas (forças de van der Waals) ou ligação envolvendo as moléculas de água ou hidratos. Quando essa aglomeração acontece, a estrutura retém uma certa quantidade de água da mistura, gerando assim, uma rede aberta de canais entre as partículas denominadas vazios, que podem aprisionar uma porção da água, que por sua vez, não irá hidratar a superfície das partículas de cimento e não fluidificará a mistura (Aïtcin, Jolicoeur e MacGregor, 1994).

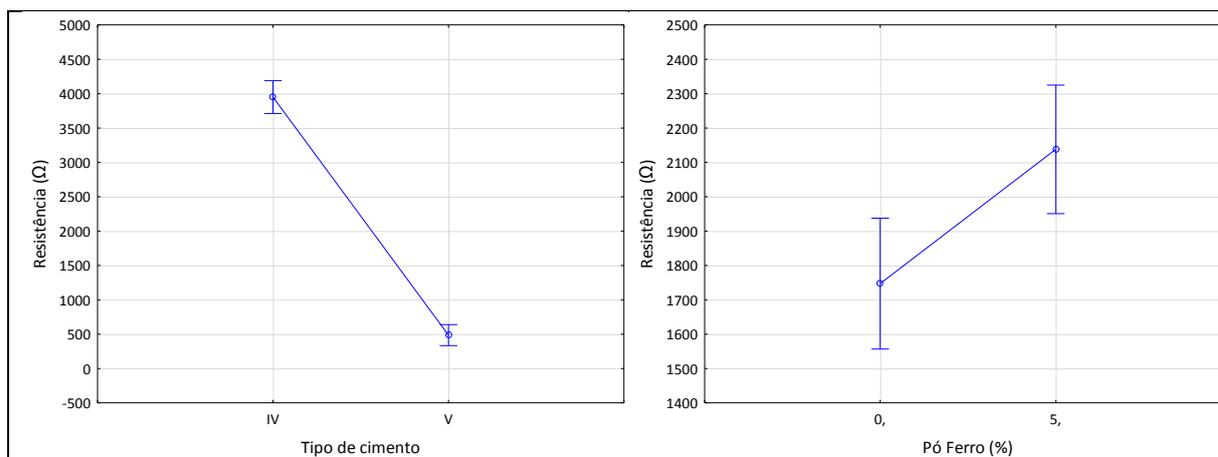
Quando se formam esses aglomerados citados anteriormente, haverá influência na reologia das suspensões, pois podem interferir no empacotamento e na microestrutura do material. Portanto, como resultado, serão gerados produtos com maior probabilidade de defeitos e com microestruturas heterogêneas (Oliveira, Studart, Pileggi e Pandolfelli, 2000).

Figura 11. Homogeneização da pasta de cimento com adição de pó de ferro



Fonte. Do autor

Figura 12. Gráficos de médias da resistência elétrica (Ω) das pastas em função do tipo de cimento e da adição de pó de ferro



Fonte. Do autor

Com a análise estatística pode-se obter o modelo de regressão para a variável de resposta em questão, a resistência ôhmica, permitindo estimar um valor esperado para esta em função do comportamento dos fatores analisados que apresentam significância superior a 95% (curvatura, tipo de cimento, adição de pó de ferro). O modelo geral da equação de regressão foi apresentado na seção referente à resistência à compressão da pasta, Eq.1.

Desta forma, a equação de resistência ôhmica da pasta (Eq.3) é:

$$R(\Omega) = 2280 - 630 \cdot x_{\text{curvatura}} - 1794 \cdot x_{\text{cimento}} - 142 \cdot x_{\text{pó de ferro}} + 85 \quad (\text{Eq.3})$$

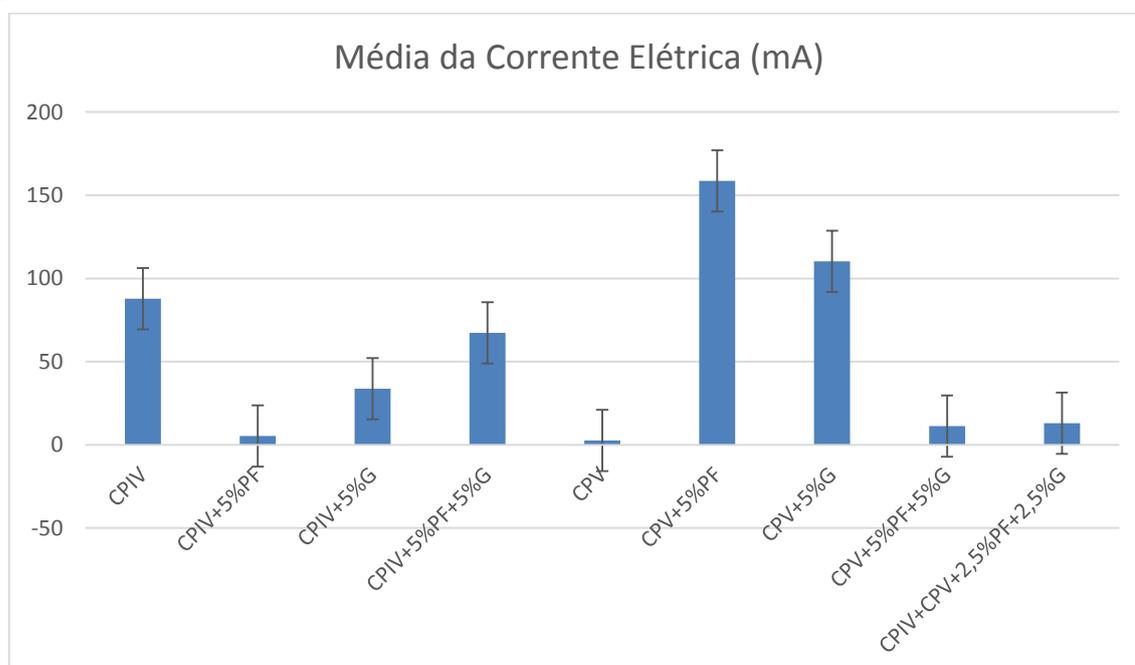
8.3 CORRENTE ELÉTRICA DA PASTA DE CIMENTO

As formulações das pastas de cimento com adição de grafite e pó de ferro foram avaliadas quanto à corrente elétrica (mA) que passa pelos corpos-de-prova, medida pelo método de Wenner ou métodos dos 4 pontos, Tabela 14 e Figura 13.

Tabela 14. Corrente elétrica (mA) medida nas pastas pelo método de Wenner

Formulação	Cimento	Grafite (%)	Pó de ferro (%)	Corr. 1 (mA)	Corr. 2 (mA)	Corr. 3 (mA)	Média (mA)
PC01	IV	0	0	96,4	42,0	125,4	87,9
PC02	IV	0	5	16,0	0,10	0,10	5,4
PC03	IV	5	0	40,5	1,0	60,0	33,8
PC04	IV	5	5	121,4	67,5	13,1	67,3
PC05	V	0	0	2,0	4,0	2,0	2,6
PC06	V	0	5	212,0	77,0	187,0	158,6
PC07	V	5	0	23,0	162,0	146,0	110,3
PC08	V	5	5	0,13	14,0	20,0	11,3
PC09	IV + V	2,5	2,5	7,0	26,0	6,0	13,0

Figura 13. Corrente elétrica (mA) das pastas determinada pelo método de Wenner



Fonte. Do autor

Para analisar o efeito da adição de grafite (0 e 5%) e pó de ferro (0 e 5%) e do tipo de cimento (CP IV e V) sobre a corrente elétrica (mA) das pastas, foi realizada a análise de variância (ANOVA), Tabela 15.

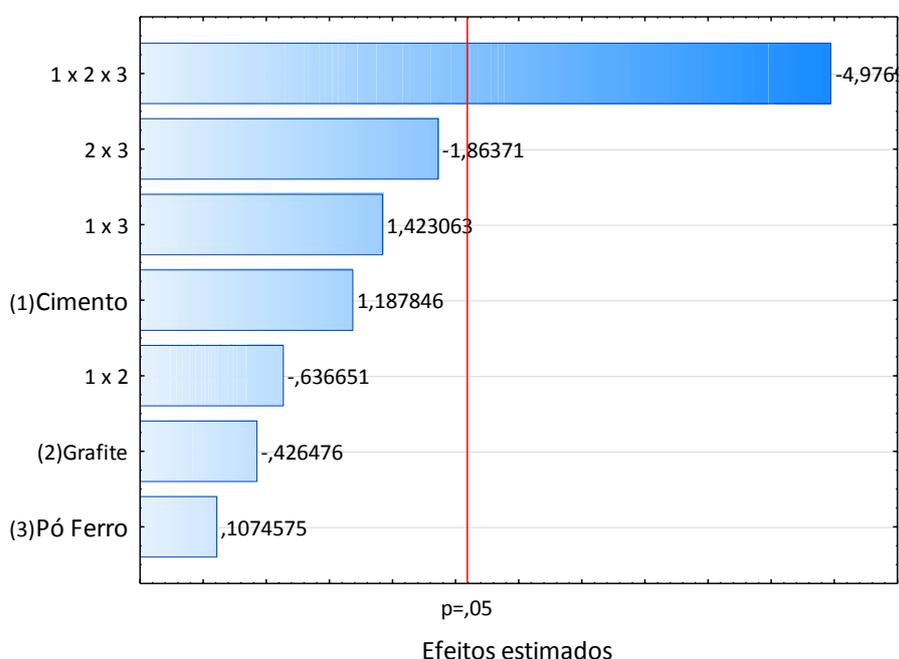
Tabela 15. ANOVA para a corrente elétrica (mA) medida nas pastas ($R^2 = 0,63$)

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Cimento	2939	1	2939	1,41	0,249
(2) Grafite	378	1	378	0,181	0,674
(3) Pó de ferro	24	1	24	0,0115	0,915
1 x 2	844	1	844	0,405	0,531
1 x 3	4219	1	4219	2,02	0,170
2 x 3	7237	1	7237	3,47	0,077
1 x 2 x 3	51612	1	51612	24,77	0,000083
Erro	39589	19	2083		
Total SS	106846	26			

Fonte. Do autor

Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Figura 14. Diagrama de Pareto para a corrente elétrica (mA) nas pastas



Fonte. Do autor.

A análise dos resultados da ANOVA para a corrente elétrica das pastas, Tabela 15, mostra que o único fator com significância estatística, dada pelo valor de p, foi a interação entre o tipo de cimento, a adição do grafite e a adição de pó de ferro,

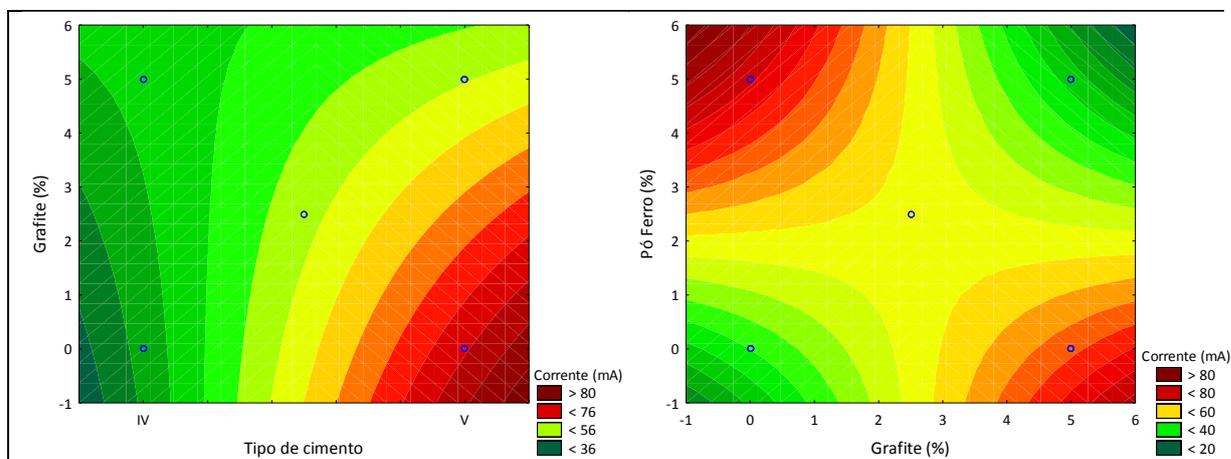
com confiabilidade maior ou igual a 95%. Os demais fatores e suas interações não apresentaram significância estatística para a resistência das pastas ($p > 0,05$). Observar que neste caso o modelo não é tão adequado aos resultados experimentais, pois o coeficiente de determinação $R^2 = 0,63$.

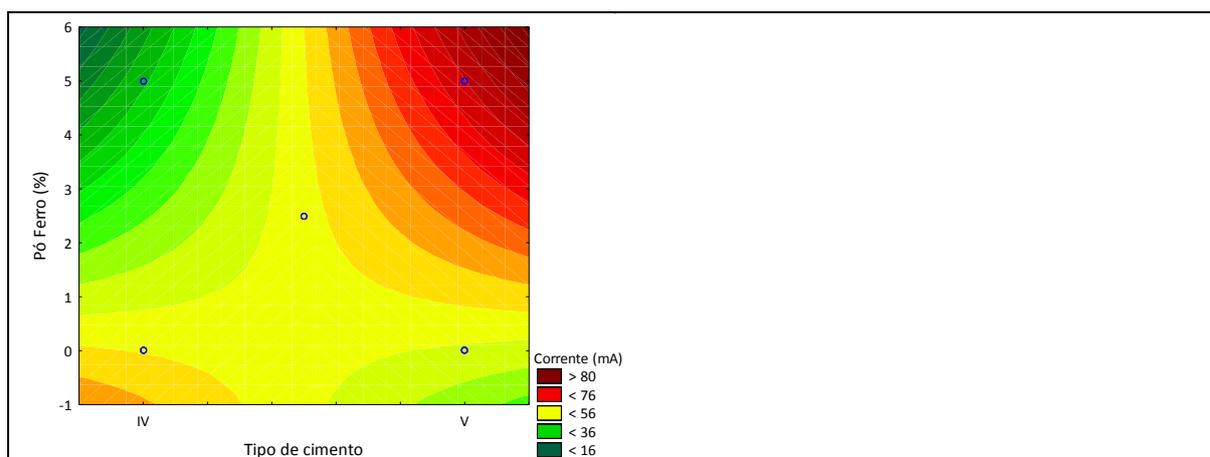
A análise do diagrama de Pareto para a corrente elétrica (Figura 14) mostra a interação do tipo de cimento, com as adições do grafite e pó de ferro com significância de 95% para os resultados obtidos.

Na Figura 15 são mostradas as curvas de contorno, para cada interação dupla, a partir da superfície de resposta. Os maiores valores de corrente são obtidos as combinações entre pasta com cimento CP V sem adição de grafite (Figura 15a), adição somente de grafite ou de pó de ferro (Figura 15b), e pasta com cimento CP V com adição de pó de ferro (Figura 15c).

A ASTM G57:2012 cita que, a medida da resistividade indica a habilidade relativa de um determinado meio em transportar correntes elétricas. A maior condução da corrente elétrica no material melhora sua capacidade de condutividade elétrica. Monfore (1968) cita que a condução da corrente elétrica através do concreto ocorre por meio dos íons presentes na água evaporável das pastas de cimento (Ca^{+2} , Na^+ , K^+ , OH^- e SO_4^-). Shekarchi et al. (2004) também citam que o fluxo da corrente elétrica no concreto se dá por meio dos íons dissolvidos na água que preenche total ou parcialmente a rede de poros interconectados da pasta.

Figura 15. Gráficos de superfície de resposta para a corrente elétrica (mA) medida nas pastas em função do tipo de cimento, da adição de grafite, e da adição de pó de ferro





Fonte. Do autor.

O modelo de regressão para a corrente elétrica que passa pelas amostras é dado por (Eq.4):

$$I(\text{mA}) = 54 - 46 \cdot x_{\text{cimento}} \cdot x_{\text{grafite}} \cdot x_{\text{pó de ferro}} + 8,8 \quad (\text{Eq.4})$$

8.4 TENSÃO ELÉTRICA DA PASTA DE CIMENTO

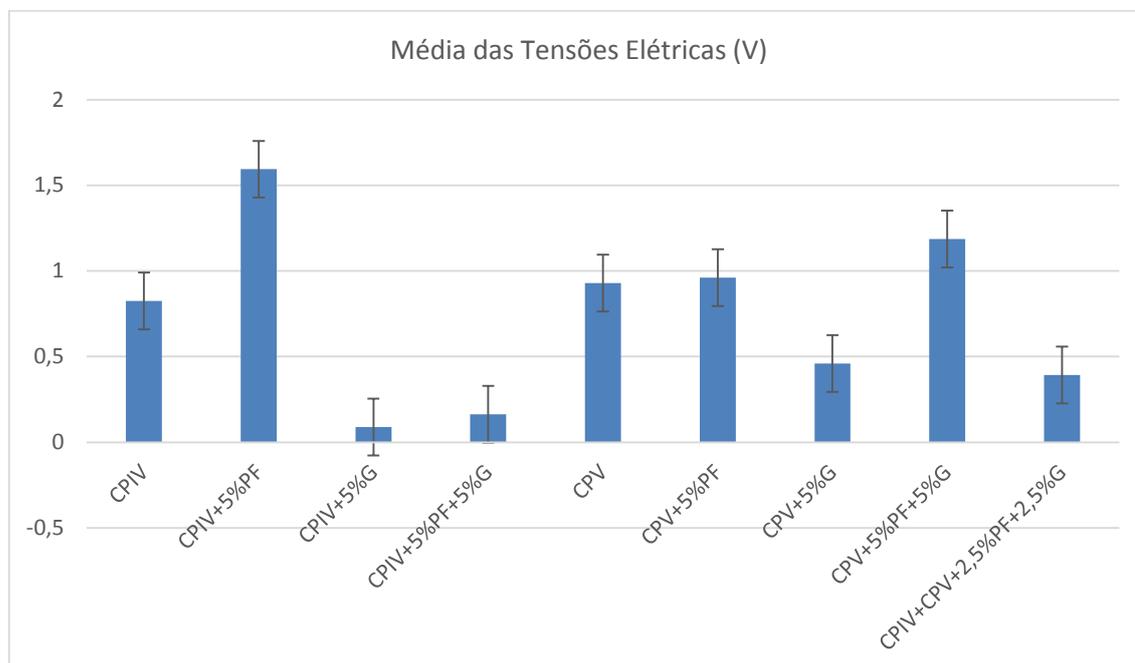
As formulações das pastas de cimento com adição de grafite e pó de ferro também foram avaliadas quanto à tensão elétrica (V) medida nos corpos-de-prova pelo método de Wenner ou métodos dos 4 pontos, Tabela 16 e Figura 16.

Tabela 16. Tensão elétrica (V) medida nas pastas pelo método de Wenner

Formulação	Cimento	Grafite (%)	Pó de ferro (%)	Tensão 1 (V)	Tensão 2 (V)	Tensão 3 (V)	Média (V)
1	IV	0	0	1,004	0,820	0,650	0,825
2	IV	0	5	0,544	3,682	0,555	1,594
3	IV	5	0	0,052	0,036	0,180	0,089
4	IV	5	5	0,222	0,117	0,150	0,163
5	V	0	0	1,060	0,952	0,778	0,930
6	V	0	5	1,043	0,910	0,931	0,961
7	V	5	0	0,361	0,445	0,574	0,460
8	V	5	5	1,048	1,540	0,970	1,186
9	IV + V	2,5	2,5	0,036	0,211	0,929	0,392

Fonte. Do autor

Figura 16. Tensão elétrica (V) das pastas determinada pelo método de Wenner



Para analisar o efeito da adição, foi adicionado grafite (0 e 5%) e pó de ferro (0 e 5%), valores com relação a massa do cimento, e do tipo de cimento (CP IV e V) sobre a tensão elétrica (V) das pastas, foi realizada a análise de variância (ANOVA) dos resultados obtidos, Tabela 17. Como para a corrente, o modelo utilizado também apresentou um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,68$.

Tabela 17. ANOVA para a tensão elétrica (V) medida nas pastas ($R^2 = 0,63$)

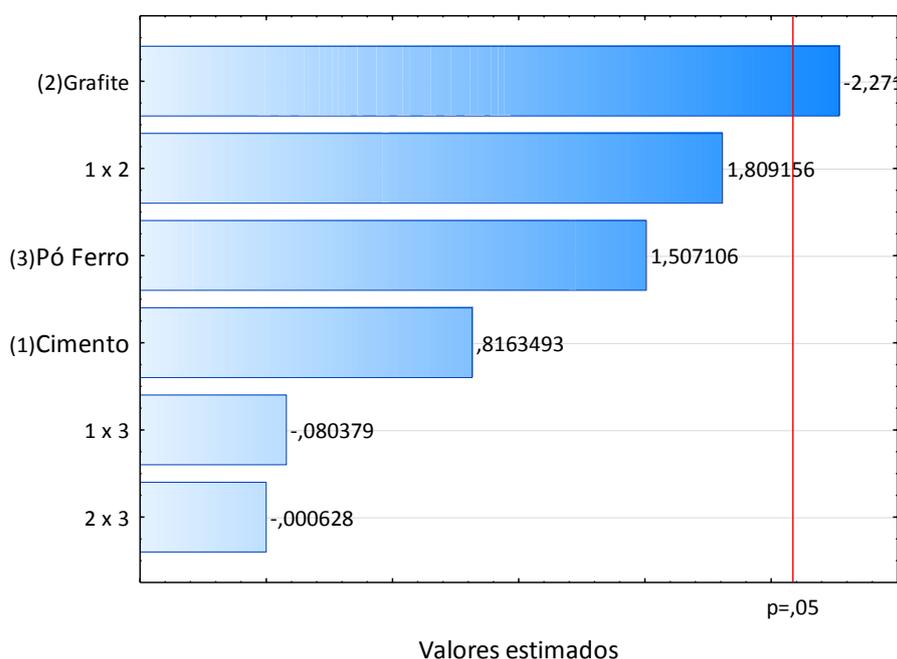
Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Cimento	0,28	1	0,28	0,66	0,42
(2) Grafite	2,18	1	2,18	5,15	0,034
(3) Pó de ferro	0,96	1	0,96	2,27	0,14
1 x 2	1,38	1	1,38	3,27	0,085
1 x 3	0,0027	1	0,0027	0,0064	0,93
2 x 3	0,00000016	1	0,00000016	0,00000039	0,99
Erro	8,45	20	0,42		
Total SS	13,26	26			

Fonte. Do autor

Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

A análise dos resultados da ANOVA para a tensão elétrica medida nas pastas, Tabela 17, mostra que o único fator com significância estatística, dada pelo valor de p , foi à adição de grafite, com confiabilidade maior ou igual a 95%. Os demais fatores e suas interações não apresentaram significância estatística para a resistência das pastas ($p > 0,05$). A análise do diagrama de Pareto para a tensão elétrica (Figura 17) mostra a adição de grafite com significância de 95% para os resultados obtidos.

Figura 17. Diagrama de Pareto para a tensão elétrica (V) das pastas

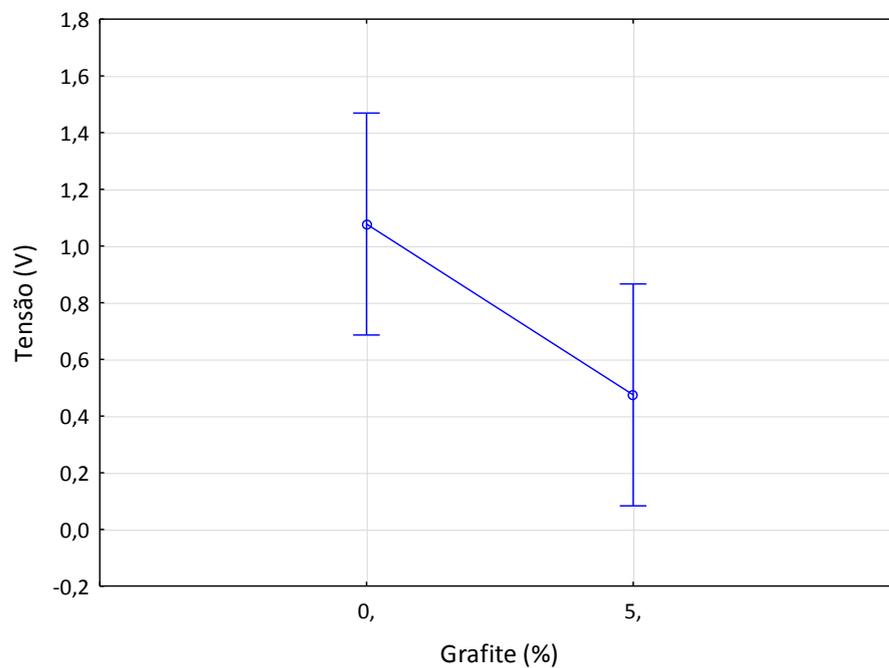


Fonte. Do autor

Como um único fator foi significativo estatisticamente para a tensão medida nos corpos-de-prova, na Figura 18 é mostrado o gráfico de médias para esta propriedade. Uma maior tensão é obtida para as pastas sem adição de grafite.

Quanto maior for a tensão obtida, maior será a capacidade de transporte de corrente elétrica, aumentando dessa forma a temperatura do material. Fowler (2013) menciona que a tensão elétrica pode ser definida como a força elétrica que gera a circulação de corrente, fazendo com que as cargas elétricas entrem em movimento. Quando há uma diferença de cargas entre dois corpos, ou entre dois pontos, diz que há uma diferença de potencial elétrico (d.d.p) ou uma tensão elétrica.

Figura 18. Gráfico de médias da tensão elétrica (V) das pastas em função do tipo de cimento e da adição de pó de ferro



Fonte. Do autor

Finalmente, o modelo de regressão para a tensão elétrica medida nas pastas é dado pela Eq.5

$$V(V) = 0,73 - 0,30 \cdot x_{\text{grafite}} + 0,12 \quad (\text{Eq.5})$$

9 CONCLUSÕES

Em relação à resistência à compressão axial da pasta de cimento, para o estudo em questão, a formulação contendo o cimento CPV ARI + 5% de grafite apresentou o melhor resultado, sendo o pior resultado a formulação de cimento CPV + CPV +2,5% de Grafite + 2,5% de pó de ferro. Porém, houve grande variabilidade nos resultados, que pode ter ocorrido devido aos vazios contidos nas pastas, pela pouca homogeneização ou pela falta de coesão entre as partículas da grafite, que visivelmente se aglomeravam no momento da mistura, provavelmente estabelecendo uma zona de transição (local entre a pasta de cimento e o agregado) frágil.

Em relação à resistividade elétrica, o melhor resultado foi para a pasta de cimento contendo o cimento CPV ARI + 5% de pó de ferro. Este tipo de cimento não contém materiais pozzolânicos, sendo assim, é mais puro e não interfere negativamente na condução da corrente elétrica. Era de se esperar que o pó de ferro, por ser um material metálico, e condutor de calor e eletricidade, melhorasse a condutividade elétrica. Porém, como fator isolado, o pó de ferro aumentou a resistividade das amostras. O grafite tem como propriedade a condução da corrente elétrica, mas como mencionado, visualmente no momento da mistura não apresentou uma boa homogeneização, e provavelmente as partículas do material tenham se aglomerado em alguns locais na pasta, fazendo com que não houvesse total conexão entre as partículas do grafite com a pasta. Outra possibilidade é que a quantidade de grafite na formulação tenha sido insuficiente, lembrando que, comercialmente não seria viável aumentar o teor de grafite na pasta de cimento.

Portanto, no estudo em questão, o cimento CPV e as adições de grafite e pó de ferro, apresentaram bons resultados finais, podendo ser utilizados para formulações de argamassas e concretos, desde que suas propriedades sejam avaliadas para estes produtos.

10 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização da presente pesquisa, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Estudo do uso de grafite com percentuais maiores do que 5%, desde que, economicamente viáveis;
- Estudo do uso do grafite com Fator A/C 0,5 e 0,6;
- Avaliação das propriedades térmicas e microestruturais da pasta de cimento;
- Formulação de pasta de cimento com adição de coque metalúrgico;
- Formulação de argamassa condutiva com pó de ferro e areia industrial basáltica;

11 REFERÊNCIAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento Portland. 7. ed. São Paulo, 2002. 28 p.

ANDRADE, C. Calculation of initiation and propagation periods of service-life of reinforcements by using the electrical resistivity. International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, RILEM Symposium, Evanston, 2004.

ARAÚJO, R.C.L.; RODRIGUES, E.H.V.; FREITAS, E.G.A. Materiais de construção. Editora Universidade Rural. v.1. Rio de Janeiro, 2000.

BAUER, L. A. F. Materiais de Construção. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 471 p.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, M. C. Standardization, to a reference of 25°C, of electrical resistivity for mortars and concretes in saturated or isolated conditions. ACI Materials Journal, v.99, No.2, p.385-390, 2002.

COUTINHO, A de Sousa, “Fabrico e Propriedades do betão”, Volume 1, LNEC, 1988.

DETWILER, R. J.; METHA, P. K. Chemical and physical effects of silica fume on the mechanical behavior of concrete. ACI Materials Journal. v. 86, n. 6, November-December, 1989, p. 609-914.

Ferreira B. E. M., Cannabrava A. C. A. e Pasqua L. P. – Testes de Resistividade do Concreto – Relatório Técnico – P&D – Estruturas de Redes de Distribuição com aterramento integrado com a ferragem interna – Poste Autoaterrado para Redes Urbanas e Rurais – Cabeça de Série – CPFL – 2012.

FOWLER, Richard. Fundamentos de eletricidade: corrente contínua e magnetismo. 7. ed. Porto Alegre: [s. n.], 2013. ISBN 978-85-8055-140-2 1.

HELENE, P.; TERZIAN, P. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. São Paulo: Ed. Pini, 1993.

HOPE, T. F. Resistividade Elétrica do Concreto Contendo Diferentes Teores de Cinza da Casca de Arroz. 2005.

HUGHES, B. P, SOLEIT A. K. O, BRIERLEY, R. W. New technique for determining the electrical resistivity of concrete. Magazine of Concrete Research. v. 37, n. 133, p. 243-248, 1985.

ISAIA, G. C., (2001). Durabilidade do concreto ou das estruturas de concreto. Reflexões sobre o tema. WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. Novembro. São José dos Campos.

LENCIONI, J. W. Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios Tese (Doutorado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, Brasil, 2011.

LOBATO, Emílio. Relatório Técnico 41: Perfil da Grafita. Belo Horizonte: J. Mendo Consultoria, 2009. 33 p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P28_RT41_Perfil_da_Grafita.pdf/e5341ed6-cc72-47f1-b3a4-eca894a2cb80>. Acesso em: 17 Out. 2019.

McCARTER, W. J, FORDE, M. C., WITTINGTON, H. W. Resistivity characteristic of concrete. Institute of Civil Engineers, Part 2. Proceedings... Edinburgh, 1981. v. 71. p. 107-117.

MARINHO, Antonio Calmon de Araújo. Efeito da adição de grafite expandido por microondas nas propriedades térmicas, elétricas e mecânicas de nanocompósitos de matriz epóxi. 2014. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. Disponível em: <http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/bitstream/123456789/12831/1/AntonioCAM_DISERT.pdf>. Acesso em: 17 Out. 2019.

MEDEIROS, Marcelo H. F.; ANDRADE, Jairo J. O.; HELENE, Paulo. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: Concreto: Ciência e Tecnologia. Ed. G. C. ISAIA. 1.ed. v.1. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto: IBRACON, 2011.

Mehta, P.K. e Monteiro, P.J.M., Concreto: estrutura, propriedades e materiais, Pini, São Paulo, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2ª edição Brasileira. 4ª Edição em inglês. São Paulo. Brasil, 2014.

M.F. Islam, Rojas, D. M. Bergey, A. t. Jonhson, and A. G. Yodh, *Nano Lett.* 3,269, (2003).

MOLIN, D. C. C. D., Adições minerais, in: ISAIA, G. C. G. C. Isaia (org). Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo, IBRACON, 2011. Cap 8, 261-309.

MONFORE, G. E. The Electrical Resistivity of Concrete. *Journal of the PCA Research and Development. Laboratories.* v. 10, n. 2, p. 35-48, 1968.

Nancy A. Soliman, Nicolas Chanut, Vincent Deman, Zoe Lallas, and Franz-Josef Ulm, Electric energy dissipation and electric tortuosity in electron conductive cement-based materials, *Phys. Rev. Materials* 4, 125401, 2020.

NBR 12655 – “Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento”. Rio de Janeiro, 2015.

NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

NBR NM 46: Agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003

NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

NBR 7117 – “Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo”. Rio de Janeiro, 2012.

NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

NBR 7217: Determinação de composição granulométrica dos agregados. Rio de Janeiro, 1982.

NBR 5419, Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida. p. 51, 2015.

NBR 5736: Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, 2016.

NBR 5738: Procedimentos para moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2016.

NBR 5739 – “Concreto – ensaios de compressão de corpo-de-prova cilíndricos”. Rio de Janeiro, 2015.

NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro 2016.

NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

NETO, B. B. Pompeu. Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência. UFPA, Belém, PA. 2011. v. 16, n. 2, pp. 690 – 702.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M, J.J. Brooks. Tecnologia do concreto. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NOVAIS, Stéfano Araújo. "Ferro (Fe)"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/ferro.htm>. Acesso em 10 de Fevereiro de 2022.

P.-C. Aitcin, C. Jolicoeur, J. G. MacGregor, Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't, Concrete Int. 16, 5 (1994) 45-52.

I. R. de Oliveira, A. R. Studart, R. G. Pileggi, V. C. Pandolfelli, Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico, Fazenda Arte Editorial, S. Paulo, SP (2000).

PETRUCCI, Eládio D. Concreto de Cimento Portland. 2. ed. Porto Alegre: Globo, 1975. 277 p.

POLDER, R.B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. Rilem TC 154 – EMC Electrochemical Techniques for Measuring Mettalic Corrosion. Construction and Building Materials, vol. 15, p. 125 – 131, March-April, 2001.

Ribeiro CC, Pinto JDS, Starling T. Materiais de Construção Civil. 3. ed. Editora UFMG: Belo Horizonte; 2013.

SANTOS, L. Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a avaliação da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto armado. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Brasília, Distrito Federal, 2006.

SEMIN, X. et al. Antonio Carlos de Almeida CPFL PIRATININGA Benedito Edmundo Moura, ENGENHARIA E SERVIÇOS. p. 1-12, 2016.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. A História do cimento no Brasil. Rio de

Janeiro: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2006. Disponível em:

www.snic.org.br/pdf/Historia_do_Cimento_no_Brasil.pdf. Acesso em: 30/10/2019.

TUAN C.Y., YEHIA S.A., “Evaluation of electrically conductive concrete containing carbon products for deicing”, ACI Materials Journal, vol. 101, no. 4, pp. 287–293, 2004.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. Electrical Resistivity of Concrete – A Literature Review. R&D Serial nº 2457, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003. 57p.

WHITTINGTON, H. W.; MCCARTER, J.; FORDE, M. C. The conduction of electricity through concrete. Magazine of concrete research, v. 33, n. 114, p.48-60, 1981.