

**HELLEN DIAS RESENDE  
LUCAS ARRUDA COIMBRA  
MURILO ROSA DE PAULA**

**REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA A  
ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA E  
CONSISTÊNCIA DE CONCRETOS**

São Paulo  
2018

**HELLEN DIAS RESENDE  
LUCAS ARRUDA COIMBRA  
MURILO ROSA DE PAULA**

**REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA A  
ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA E  
CONSISTÊNCIA DE CONCRETOS**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para ob-  
tenção do Título de Engenheiro Civil.

São Paulo  
2018

**HELLEN DIAS RESENDE  
LUCAS ARRUDA COIMBRA  
MURILO ROSA DE PAULA**

**REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA A  
ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA E  
CONSISTÊNCIA DE CONCRETOS**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para ob-  
tenção do Título de Engenheiro Civil.

Orientador:

Prof. Dr. Rafael Giuliano Pileggi

Co-orientador:

Dr. Markus Samuel Rebmann

São Paulo  
2018

---

Prof. Dr. Rafael Giuliano Pileggi

---

Prof. Dr. Sérgio Cirelli Angulo

---

Prof. Dr. Vanderley Moacyr John

## Dedicatória

Aos nossos pais,  
Rose e José, Laudecy e Júnior (*in memoriam*), Bel e Ademir  
pelo apoio, amor, carinho, e por estarem presentes em todos os momentos.

# AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus.

Agradecemos aos nossos pais, Rosilene De Lourdes Dias e José de Souza Resende, Laudecy Coelho Arruda Coimbra e Raimundo Coimbra Júnior (*in memoriam*), Ademir Rosa de Paula e Isabel Cristina Carreteiro de Paula, por nos apoiarem e darem forças para que pudéssemos realizar esse trabalho da melhor maneira possível.

Aos nossos irmãos, Henrique Dias Resende, Larissa Arruda Coimbra e Natália Arruda Coimbra, Tiago Rosa de Paula e Luiz Augusto de Moraes, por serem sempre companheiros e estarem presentes em todos os momentos.

Agradecemos ao nosso orientador, Prof. Dr. Rafael Giuliano Pileggi, por todos os conselhos, pela paciência e ajuda nesse período.

Agradecemos ao nosso co-orientador Markus Samuel Rebmann, que nos deu grande suporte e ajuda. E também ao Marcus Coimbra Israel, que sempre acreditou no nosso potencial.

Aos nossos amigos Filipe Rodrigues de Abreu, Giovane Medeiros Canato e Gabriel Piazzalunga, por todo apoio e ajuda.

Aos professores Dr. Vanderley Moacyr John e Dr. Sérgio Cirelli Ângulo, por aceitarem fazer parte da nossa banca e nos ajudarem a realizar um bom trabalho.

*“É melhor acender uma vela do que  
praguejar contra a escuridão.”*

-- William L. Watkinson

# RESUMO

A indústria da construção civil tem se modernizado continuamente para atender suas demandas de forma mais rápida e eficiente. Sendo o concreto um dos produtos que mais movimentam esse mercado, tornam-se necessárias ferramentas ou modelos de análise que possam classificar esse material de maneira confiável e precisa, minimizando desperdícios e garantindo o nível de serviço exigido do produto. Os dois parâmetros alvo desse estudo são a resistência e a consistência, que são especificadas no momento da compra do concreto. O trabalho consiste no desenvolvimento de redes neurais artificiais que, a partir de dados de entrada, como a formulação, temperatura ambiente, dentre outros, estime os dois parâmetros citados. Primeiramente, foi feita uma revisão bibliográfica para aprofundar os conhecimentos teóricos do material, estudando desde a importância de se medir a resistência e consistência do concreto até a interferência de seus componentes nas suas características finais. Além desses conceitos, foi desenvolvido um estudo sobre redes neurais artificiais, processamento de dados e modelos matemáticos e estatísticos necessários para desenvolver essa ferramenta, tornando possíveis tais estimativas. Para o treinamento da rede, utilizou-se mais de 8 mil dados distintos de formulação, granulometria, temperatura de amostra, temperaturas ambientes, resistências, consistências, dentre outras informações sobre concretos utilizados na obra da usina hidrelétrica de Santo Antônio (Porto Velho - RO) em parceria com Furnas. Para o aprimoramento dos resultados, fez-se necessário, a partir destes dados fornecidos, o cálculo de parâmetros importantes para o cálculo da resistência e consistência do material, que são a sua porosidade, o MPT e o IPS. Com essas informações calculadas e as variáveis iniciais disponíveis como dados de entrada, treinou-se a rede, buscando uma estimativa aproximada das resistências e consistências dos concretos, a fim de encontrar os melhores resultados. Algumas análises retornaram pouca ou nenhuma correlação, como a feita para se determinar a influência da temperatura da amostra na resistência do material, porém algumas apresentaram resultados significativos, como a correlação entre a consistência do concreto e o seu valor estimado, ao se considerar o MPT e a massa de água presente na amostra. As maiores correlações entre resultados estimados e esperados calculados através das redes neurais artificiais foram  $r^2$  de 80% para as resistências, e 93% para as consistências.

**Palavras-Chave** – Concreto, Consistência, Resistência, Estimativa, Processamento de Dados, Redes Neurais Artificiais.

# ABSTRACT

The construction industry has been increasingly modernized to meet its demands more quickly and efficiently. Since concrete is one of the products that moves this market the most, it becomes necessary tools or models of analysis that can classify this material in a reliable and precise way, minimizing waste and ensuring the level of service required for the product. The two target parameters of this study are strength and consistency, which are specified at the time of purchase of the concrete. The work is developed in artificial neural networks that, from input data, such as a formulation, ambient temperature, among others, estimate the two parameters mentioned. First, a bibliographical review was done to deepen the theoretical knowledge of the material, studying from the importance of measuring the strength and consistency of the concrete to the interference of its components in their final characteristics. For the training of the network, it was used more than 8 thousand different data of formulation, granulometry, sample temperature, ambient temperatures, strengths, consistencies, among other information about concrete used in the work of the hydroelectric plant of Santo Antônio (Porto Velho - RO) in partnership with Furnas. For the improvement of the results, it was necessary, from this data provided, the calculation of important parameters for calculating the strength and consistency of the material, which are its porosity, MPT and IPS. With this calculated information and the initial variables available as input data, the network was trained, seeking an approximate estimate of the strengths and consistencies of concrete, in order to find the best results. Some analyzes returned little or no correlation, such as that made to determine the influence of the temperature of the sample on the strength of the material, but some showed significant results, such as the correlation between the concrete consistency and its estimated value, considering the MPT and the water mass present in the sample. The highest correlations between estimated and expected results calculated through the artificial neural networks were 80% for the strengths, and 93% for the consistencies

**Keywords** – Concrete, Consistency, Strength, Prediction, Data Processing, Artificial Neural Networks.

## LISTA DE FIGURAS

1	Relação inversa fundamental entre porosidade e resistência. Fonte: [1] . . .	21
2	Fórmulas para o cálculo da porosidade, desconsiderando o ar incorporado.	22
3	Cálculo da porosidade, considerando o ar incorporado. Fonte: [2] . . . . .	22
4	Agregados dispersos na pasta do concreto e significado do MPT. Fonte: [3].	23
5	Fórmula do IPS e representação da grandeza. Fonte: Adaptado de Innocentini et. al, 2002. . . . .	25
6	Relação entre a resistência e relação água/cimento do concreto. Fonte: [4] .	27
7	Influência da dimensão máxima do agregado na resistência do concreto para diferentes relações a/c. Fonte: Cordon, W.A.; Gillespie H.A., <i>J. ACI, Proc.</i> v. 60, n. 8 1963, apud [1] . . . . .	28
8	Relação entre a resistência (eliminando os efeitos da relação a/c) e o MPT. Fonte: [3] . . . . .	29
9	Influência da temperatura do concreto em seu abatimento. Fonte: KLIEGER, 1958 e ACI Committee 305, 2013, apud [5] . . . . .	31
10	Influência da temperatura de moldagem na resistência inicial do concreto com razão água/cimento igual a 0,53 e temperatura de armazenamento constante igual a 21°C. Fonte: <i>Concrete Manual</i> , U.S. Bureau of Reclamation, 1975, apud [1] . . . . .	31
11	Influência do ar incorporado e da razão água/cimento na resistência do concreto. Fonte: <i>Concrete Manual</i> , U.S. Bureau of Reclamation, 1981, apud [1] . . . . .	33
12	Influência do ar incorporado e do consumo de cimento na resistência do concreto. Fonte: Cordon, W.A., <i>Properties, Evaluation, and Control of Engineering Materials</i> , McGraw-Hill, New York, 1979, apud [1] . . . . .	33
13	Redução na demanda de água de amassamento devido à adição de ar por aditivo incorporador de ar. Fonte: [4] . . . . .	35

14	Influência do diâmetro do corpo-de-prova na resistência, com razão altura/diâmetro igual a 2. Fonte: <i>Concrete Manual</i> , U.S. Bureau of Reclamation, pp. 574-575, 1975, apud [1] . . . . .	36
15	Influência da razão altura/diâmetro na resistência do corpo-de-prova. Fonte: <i>Concrete Manual</i> , U.S. Bureau of Reclamation, pp. 574-575, 1975, apud [1]	37
16	Ensaio de resistência à compressão de concreto com ruptura tipo coluna . .	39
17	Arquitetura de uma rede neural artificial típica. Fonte: [6] . . . . .	48
18	Da esquerda para a direita: tabela com métodos estatísticos para análise de tendência central, medidas de propagação, métodos de visualização; caixa de comparação estatística; histograma. Fonte: [7]. . . . .	50
19	Gráficos de dispersão entre duas variáveis quantitativas. Nela há exemplos de correlações fortes e positivas ( <i>strong positive</i> ), fortes e negativas ( <i>strong negative</i> ), moderadas e positivas ( <i>moderate positive</i> ), moderadas e negativas ( <i>moderate negative</i> ), relação curvilínea ( <i>curvilinear relationship</i> ), e sem correlação ( <i>no correlation</i> ). Fonte: [7]. . . . .	51
20	Visualização de conjuntos de dados linearmente separáveis e não linearmente separáveis. Fonte: [8] . . . . .	55
21	Rede Neural Artificial de exemplo (Rede 1) com uma camada de input ( $x_1$ e $x_2$ ), uma escondida ( $e_1$ e $e_2$ ) e uma de output ( $y_1$ e $y_2$ ). Fonte: elaborada pelos autores . . . . .	56
22	Gráfico de dispersão entre relação a/c e resistência. Fonte: elaborada pelos autores. . . . .	65
23	Gráfico de dispersão entre a porosidade (desconsiderando-se o ar incorporado) e a resistência. Fonte: elaborada pelos autores. . . . .	66
24	Gráfico de dispersão entre a porosidade calculada pelo método de Neville (considerando-se o ar incorporado) e a resistência. Fonte: elaborada pelos autores. . . . .	67
25	Gráfico de dispersão entre as resistências estimadas e ensaiadas, tendo como variáveis o MPT e a massa de água. Fonte: elaborada pelos autores. . . . .	68
26	Gráfico de dispersão entre as consistências estimadas e ensaiadas, tendo como variáveis as massas de agregados. Fonte: elaborada pelos autores. . .	69

27	Gráfico de dispersão entre as consistências estimadas e ensaiadas, tendo como variáveis os aditivos da família dos plastificantes. Fonte: elaborada pelos autores. . . . .	70
28	Gráfico de dispersão entre as consistências estimadas e ensaiadas, tendo como variáveis os três aditivos e o ar incorporado. Fonte: elaborada pelos autores. . . . .	71
29	Gráfico da correlação entre o MPT médio e a consistência. Fonte: elaborada pelos autores. . . . .	72
30	Gráfico de dispersão entre as consistências estimadas e ensaiadas, tendo como variáveis o MPT e a massa de água. Fonte: elaborada pelos autores.	73
31	Gráfico da correlação entre resistências estimadas e resistências esperadas. Fonte: elaborada pelos autores. . . . .	74
32	Gráfico da correlação entre resistências estimadas e resistências esperadas, utilizando apenas doze variáveis. Fonte: elaborada pelos autores. . . . .	75
33	Gráfico da correlação entre consistências estimadas e consistências esperadas. Fonte: elaborada pelos autores. . . . .	77
34	Gráfico da correlação entre consistências estimadas e consistências esperadas, utilizando apenas doze variáveis. Fonte: elaborada pelos autores. . . .	78
35	Fluxograma de aceitação da água para amassamento do concreto. Fonte: ABNT 15900:2009 . . . . .	84

# LISTA DE TABELAS

1	Classificação dos aditivos em função da redução de água, da dosagem típica e do incremento de resistência à compressão de concretos. Fonte: [1] . . . .	34
2	Relação entre trabalhabilidade e grandeza de abatimento. Fonte: [2] . . . .	38
3	Limite de abatimento no Slump-test. Fonte: [9] . . . . .	38
4	Principais tipos de concreto dosado em central e suas características.Fonte: [10] . . . . .	40
5	Controle tecnológico de materiais, Fonte: [11] . . . . .	43
6	Ensaio Regulares, Fonte: [11] . . . . .	43
7	Tabela bidirecional com duas variáveis categóricas: tipo de concreto e intervalos de consistência. Fonte: elaborada pelos autores . . . . .	52
8	Valores críticos de $\chi^2$ para cada uma das probabilidades, em função dos graus de liberdade. Fonte: [12] . . . . .	53
9	Grandezas consideradas nos cálculos da porosidade, MPT e IPS. Fonte: Valores estimados baseados em análises das bases fornecidas pela Eletrobras Furnas . . . . .	60
10	Peso das variáveis do concreto para a obtenção da consistência. Fonte: elaborada pelos autores. . . . .	74
11	Peso das variáveis do concreto para a obtenção da consistência. . . . .	76
12	Limites de composição do cimento Portland CP IV (porcentagem em massa) Fonte: [13] . . . . .	85
13	Requisitos físicos e mecânicos do cimento CP IV. Fonte: [13] . . . . .	85
14	Determinações facultativas do cimento CP IV. Fonte: [13] . . . . .	85
15	Critérios de conformidade do cimento para classe de resistência. Fonte: [13]	85
16	Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo. Fonte: [14] . .	86
17	Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo. Fonte: [14] . .	86

18	Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado miúdo com relação à massa do material. Fonte: [14] . . . . .	87
19	Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado graúdo com relação à massa do material. Fonte: [14] . . . . .	87
20	Requisitos gerais dos aditivos. Fonte: [15] . . . . .	88
21	Dados sobre os concretos da margem esquerda da obra da UHE Santo Antônio (Porto Velho - RO). Fonte: Planilhas de Excel fornecida pela Eletrobras Furnas. . . . .	90

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>20</b>
3.1	Resistência . . . . .	20
3.1.1	Porosidade . . . . .	21
3.1.2	MPT (Maximum Paste Thickness) . . . . .	23
3.2	Consistência . . . . .	24
3.2.1	MPT (Maximum Paste Thickness) . . . . .	24
3.2.2	IPS (Inter Particle Spacing) . . . . .	24
3.3	Componentes do concreto e sua influência na resistência e consistência . . .	25
3.3.1	Água . . . . .	25
3.3.1.1	A água e a resistência mecânica do concreto . . . . .	26
3.3.1.2	A água e a consistência do concreto . . . . .	27
3.3.2	Agregados . . . . .	28
3.3.2.1	Influência dos agregados na resistência do concreto . . . .	28
3.3.2.2	Influência dos agregados na consistência do concreto . . . .	29
3.3.3	Temperatura da amostra . . . . .	30
3.3.4	Ar incorporado . . . . .	32
3.3.5	Sílica ativa . . . . .	33
3.3.6	Aditivos químicos . . . . .	34
3.3.6.1	Aditivo plastificante em pó (APP), superplastificante (ASP) e hiper plastificante (AHP) . . . . .	34

3.3.6.2	Aditivo incorporador de ar (AIA) . . . . .	35
3.3.6.3	Aditivo acelerador de pega (AA) . . . . .	35
3.3.6.4	Aditivo polifuncional (AP) . . . . .	36
3.3.7	Dimensões do corpo-de-prova . . . . .	36
3.4	Ensaio de qualidade . . . . .	37
3.4.1	Ensaio de abatimento (Slump Test) . . . . .	37
3.4.2	Ensaio de resistência . . . . .	38
3.5	Processo de Produção . . . . .	39
3.5.1	Tipos de Concreto . . . . .	39
3.5.2	Etapas de Fabricação . . . . .	40
3.6	Gestão da Qualidade . . . . .	42
3.7	Referências normativas . . . . .	43
3.7.1	ABNT NBR 15900:2009 - Água para amassamento do concreto . . . . .	44
3.7.2	ABNT NBR 16697:2018 - Cimento Portland - Requisitos . . . . .	44
3.7.3	ABNT NBR 7211 - Agregado para concreto - Especificação . . . . .	45
3.7.4	ABNT NBR 11768:2011 - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos . . . . .	46
3.8	Redes Neurais Artificiais . . . . .	47
3.8.1	Arquitetura de uma RNA . . . . .	47
3.8.2	Pré-processamento dos dados . . . . .	48
3.8.2.1	Classificação de variáveis . . . . .	49
3.8.2.2	Tratamento de valores inconsistentes ou faltantes . . . . .	49
3.8.2.3	Escalonamento de atributos . . . . .	53
3.8.3	Treinamento da rede . . . . .	54
3.8.3.1	Algoritmo de retropropagação ( <i>Backpropagation</i> ) . . . . .	54

4.1	Estimativa da Resistência . . . . .	59
4.2	Estimativa da Consistência . . . . .	60
4.3	Desenvolvimento do software . . . . .	62
4.3.1	Importação e tratamento de dados . . . . .	62
4.3.2	Treinamento e teste das redes neurais . . . . .	63
4.3.2.1	Camadas escondidas e épocas . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>65</b>
5.1	Correlações entre os parâmetros e as variáveis calculadas . . . . .	65
5.1.1	Resistência . . . . .	65
5.1.1.1	Relação água/cimento . . . . .	65
5.1.1.2	Porosidade . . . . .	66
5.1.1.3	Temperatura ambiente e temperatura da amostra . . . . .	67
5.1.1.4	Ar Incorporado . . . . .	68
5.1.1.5	Maximum Paste Thickness (MPT) . . . . .	68
5.1.2	Consistência . . . . .	69
5.1.2.1	Agregados . . . . .	69
5.1.2.2	Aditivos . . . . .	69
5.1.2.3	Temperatura ambiente e temperatura da amostra . . . . .	71
5.1.2.4	Ar incorporado . . . . .	71
5.1.2.5	Maximum Paste Thickness (MPT) . . . . .	71
5.2	Efetividade das redes neurais . . . . .	73
5.2.1	Efetividade das redes na estimativa da resistência . . . . .	73
5.2.2	Efetividade das redes na estimativa da consistência . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Considerações Finais e Recomendações para Trabalhos Futuros</b>	<b>79</b>
6.1	Considerações Finais . . . . .	79
6.2	Recomendações para Trabalhos Futuros . . . . .	80

Referências	81
Anexo A – Referências normativas	84
Anexo B – Variáveis analisadas	89

# 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o segundo material mais consumido no mundo, atrás apenas da água [16]. Devido a sua ampla utilização, houve um crescimento significativo dos estudos na área. A tendência do mercado da construção civil é avançar com a tecnologia, aperfeiçoando as técnicas, a fim de garantir alto desempenho dos materiais, baixo custo e ações mais sustentáveis (reduzindo a emissão de agentes poluentes, economia de matéria prima e de energia, por exemplo). Dessa forma, a estimativa da resistência e consistência dos concretos seria útil para auxiliar as concreteiras, antecipando possíveis erros de dosagem, diminuindo o desperdício e ainda produzindo traços mais eficientes. Para que tais estimativas pudessem ser feitas, as redes neurais mostraram-se uma boa alternativa, sendo uma forma de inteligência artificial adequada ao formato dos dados de entrada disponíveis. Unindo os resultados gerados por essa inteligência artificial às análises teóricas de seus resultados, tem-se em uma ferramenta de auxílio às concreteiras, podendo-se aprimorar as suas técnicas de dosagem e ter um controle sobre esses parâmetros antes mesmo do concreto ser produzido.

A base para o estudo desse trabalho são os ensaios de concreto realizados durante a obra da UHE Santo Antônio, localizada em Porto Velho, capital de Rondônia. Com os dados de ensaios (como teor água/cimento, ar incorporado, granulometria dos agregados) e com parâmetros importantes calculados, identificou-se correspondências entre estes dados de entrada e os parâmetros alvo (resistência e consistência do concreto). Isso foi possível através das redes neurais artificiais e de correlações diretas entre os principais dados de entrada e a resistência e consistência medidas nos ensaios. Foi necessária a realização de algumas aproximações por falta de dados na base trabalhada porém, mesmo com isso, as redes se mostraram eficientes em suas estimativas.

Ao final do estudo, foi possível identificar as correlações e suas intensidades, reconhecendo quais são os fatores que mais interferem na resistência e consistência do concreto. Além disso, torna-se necessária uma avaliação entre os resultados encontrados e esperados pela literatura e de fatores que estão envolvidos nesta avaliação, como os controles de

qualidade feitos em obra. Após estas análises, determinou-se a eficiência do uso das redes neurais nestas estimativas, identificando se é possível calcular a resistência e a consistência de forma confiável.

Este trabalho é o primeiro passo para que se possa desenvolver uma ferramenta de auxílio à etapa de dosagem de concretos, a fim de garantir uma boa qualidade com um melhor aproveitamento das matérias-primas, podendo-se expandir os resultados encontrados para casos mais amplos do que a análise da UHE que foi base para este estudo.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estimar a consistência e a resistência de concretos, utilizando os dados dos ensaios realizados na medição destes parâmetros durante a obra da barragem de Santo Antônio, em Porto Velho - RO, e demais parâmetros de interesse calculados. Para isso, conta-se com o apoio de redes neurais artificiais, que devem atribuir pesos aos componentes do concreto e obter suas correlações com a resistência e consistência do mesmo. Com tais resultados gerados e analisados, espera-se entender melhor como cada componente está correlacionado com suas características, tendo condições de possibilitar a estimativa da resistência e a consistência de novos concretos a partir desse estudo, além de poder determinar quais parâmetros não demandam tanta atenção nesta avaliação, por apresentarem pouca influência nos resultados. Assim, este estudo será importante para o auxílio na etapa de dosagem de concretos, possibilitando determinar previamente o volume necessário de cada material, bem como os controles de qualidade necessários, para que se atinja a consistência e resistência desejada.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo da revisão bibliográfica serão introduzidos os principais referenciais teóricos para o desenvolvimento do projeto final.

### 3.1 Resistência

A resistência de um material pode ser definida como a sua capacidade de resistir a tensões antes de seu rompimento. No caso do concreto, a resistência característica é o parâmetro mais importante no seu controle de qualidade, sendo uma das especificações do projetista. Esta corresponde ao valor da resistência que tem 95% de probabilidade de ser alcançado.

Segundo Mehta e Monteiro [1], o ensaio de resistência aos 28 dias é aceito de forma universal como o índice geral de resistência do concreto. A resistência à compressão simples é obtida através dos ensaios dos corpos de prova, que deve ir de acordo com a NBR 5738 [17] e a NBR 5739 [18].

Para o cálculo da resistência característica precisa-se obter o  $f_{cm}$ , que consiste na resistência média dos corpos de prova que representam a amostra. Nas obras em geral, é calculado o  $f_{ck}$  estimado devido ao tamanho da amostra (poucos corpos de prova). O cálculo da resistência característica é feito da seguinte forma:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65.s$$

s: desvio padrão

Existem diferentes abordagens sobre os principais fatores que determinam a resistência do concreto. As abordagens mais usuais (Lei de Abrams) dizem que a relação água/cimento é que determina a resistência do concreto. Quanto maior a quantidade de água na mistura, menor seria a sua resistência resultante. Porém a relação água/cimento por si só não é suficiente para conseguir estimar a resistência do concreto. Uma forma mais eficiente de estimá-la é através da porosidade. Já François de Larrard em [3], levando para um lado

um pouco mais científico, estuda a influência da pasta e dos agregados nas propriedades do concreto, trazendo o conceito da espessura máxima da pasta (MPT), citada por T.C Powers em 1968. Esses conceitos serão discutidos a seguir.

### 3.1.1 Porosidade

Segundo Mehta e Monteiro [1], existe uma relação inversa entre porosidade e resistência. Essa relação é dada pela expressão a seguir, podendo ser usada para diferentes tipos de materiais:

$$S = S_0 \cdot e^{-kp}$$

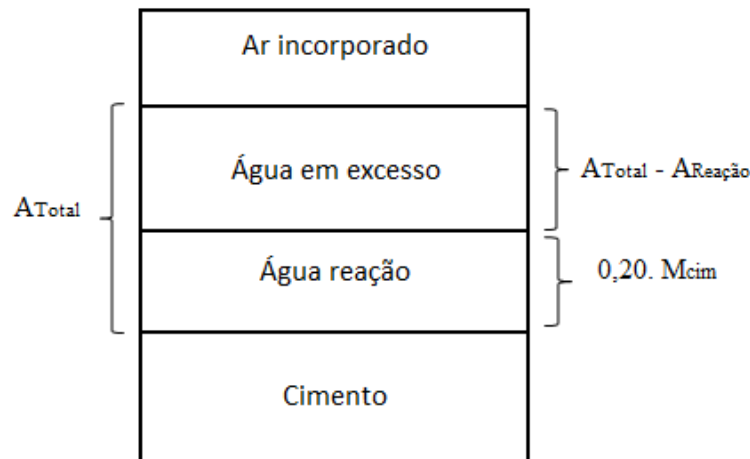
**S: Resistência do material que tem uma dada porosidade p**

**S<sub>0</sub>: Resistência intrínseca sob porosidade zero**

**K: constante**

Figura 1: Relação inversa fundamental entre porosidade e resistência. Fonte: [1]

Segundo o mesmo autor, a resistência do concreto é dada tanto pela resistência da matriz quanto da zona de transição na interface, sofrendo grande influência da relação água/cimento. Isso porque a quantidade de água influencia o número e tamanho dos poros no concreto, juntamente com o ar incorporado. Tanto o ar incorporado quanto o ar aprisionado durante o processo de mistura possuem diâmetros muito maiores do que os vazios capilares, prejudicando a resistência do concreto. Desconsiderando a presença de ar incorporado, o cálculo da porosidade da pasta é feito através das grandezas da figura 2 e das fórmulas abaixo:



$$V_{Poros} = \frac{(A_{Total} - A_{Reação})}{\rho_w} + (1-h) \cdot \frac{A_{Reação}}{\rho_w} + 0,25 \cdot h \cdot \frac{A_{Reação}}{\rho_w}$$

$$Porosidade = \frac{V_{Poros}}{V_{Total}}$$

Figura 2: Fórmulas para o cálculo da porosidade, desconsiderando o ar incorporado.

Considerando o ar incorporado, de acordo com Neville em [2], o cálculo é feito através da fórmula presente na figura 3:

$\frac{A}{C}$ : relação água/cimento ar: volume de ar na pasta de cimento fresca h: grau de hidratação
<b>Porosidade total (pt)</b>
$p_t = \frac{\frac{A}{C} + \frac{ar}{C} - 0,17 h}{0,317 + \frac{A}{C} + \frac{ar}{C}}$

Figura 3: Cálculo da porosidade, considerando o ar incorporado. Fonte: [2]

Um último fator, não menos importante, é o adensamento do concreto. Esse parâmetro fica sob a responsabilidade do profissional da concretagem, sendo muito difícil de medir. Um concreto adensado de forma incorreta produzirá vazios, comprometendo a sua resistência no estado endurecido. Para garantir um adensamento adequado, além de uma boa execução, é necessário que o concreto fresco apresente uma consistência compatível

com a da obra em que será utilizado, uma quantidade adequada de água (evitando segregação e exsudação excessiva) e as dimensões dos agregados respeitando os afastamentos entre armaduras.

### 3.1.2 MPT (Maximum Paste Thickness)

Esse conceito surgiu com Powers, em 1968. Este parâmetro expressa a distância entre os agregados no concreto, influenciando nas características reológicas da mistura. Quanto maior o MPT, maior a espessura da pasta entre os agregados, gerando um aumento das tensões na região e, posteriormente, uma diminuição da resistência do concreto. Segundo os autores do artigo [19], a matriz é dividida em três partes. A primeira delas é a que envolve os grãos dos agregados, outra que preenche vazios criados entre eles e, por último, a fração excedente. Esta é a responsável por separar os grãos de agregado, ou seja, que influencia diretamente no valor do MPT. A figura a seguir ilustra o conceito do MPT:



Figura 4: Agregados dispersos na pasta do concreto e significado do MPT. Fonte: [3].

O MPT pode ser calculado através de dois métodos diferentes, um deles desenvolvido por De Larrard e Belloc (1997) e outro por Pileggi (2001), tendo como maior diferença a consideração da área específica dos agregados. Para os cálculos do MPT neste trabalho, utilizaremos o segundo método, sendo mais adequado ao nosso modelo de dados. Sua fórmula é representada a seguir:

$$MPT = \left(\frac{2}{VSAg}\right) \cdot \left[\left(\frac{1}{V_s}\right) - \left(\frac{1}{1 - P_o}\right)\right] \quad (3.1)$$

VSAg: área superficial volumétrica dos grãos grossos ( $m^2/cm^3$ )

Vs: concentração volumétrica dos grãos grossos

Po: porosidade entre os grãos grossos, considerando-os perfeitamente empacotados

Tal conceito avalia a influência da pasta de cimento na resistência à compressão do concreto. Porém, o MPT também será utilizado para testar correlações com a consistência do concreto, tema que será discutido a seguir.

## **3.2 Consistência**

A consistência desejada do concreto varia de acordo com a obra e sua aplicação. É um parâmetro físico que relaciona a mobilidade da pasta e a coesão entre os demais componentes. A consistência do concreto é influenciada, principalmente, pela água, o ar incorporado e os aditivos (plastificantes e incorporadores de ar). Essas variáveis serão estudadas nos próximos capítulos, sendo discutidos aqui os conceitos de MPT e IPS e sua influência na consistência dos concretos.

### **3.2.1 MPT (Maximum Paste Thickness)**

Um aspecto que também interfere na consistência e que será avaliado através das redes neurais é o MPT, citado no capítulo anterior. Quanto maior o MPT mais fácil será a movimentação entre a pasta e os agregados, garantindo maior fluidez à mistura. Diferentes pastas podem ter valores próximos de MPT e consistências diferentes. Devido a isso, a forma mais eficaz de analisar a correlação entre o MPT e a consistência é adicionando à análise o IPS.

### **3.2.2 IPS (Inter Particle Spacing)**

O IPS (Inter Particle Spacing) é a distância de separação interparticular na matriz, a qual está relacionada aos finos do concreto e sua porosidade. A adição do IPS à análise traz informações referentes aos sólidos finos presentes na pasta, complementando assim a análise da consistência. A fórmula do IPS é semelhante à do MPT, e pode ser vista na imagem 5.

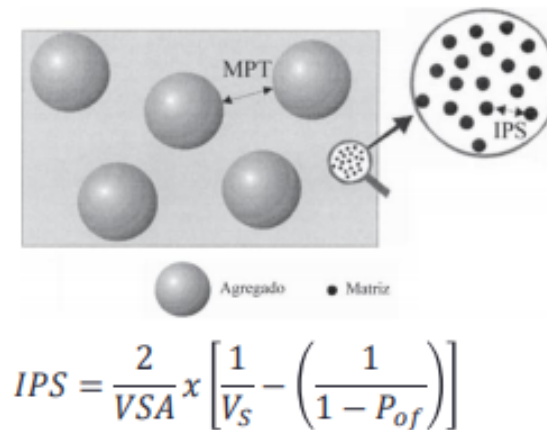


Figura 5: Fórmula do IPS e representação da grandeza. Fonte: Adaptado de Innocentini et. al, 2002.

VSA: área superficial volumétrica das partículas finas da matriz ( $m^2/cm^3$ )

Vs: fração volumétrica de sólidos finos na mistura

Pof: porosidade teórica do sistema

Quanto menor for o IPS, maior será o atrito entre os finos, uma vez que a área superficial destas partículas será maior. A consequência disso é o aumento da viscosidade da pasta, tornando-o menos fluido.

O principal fator que altera o IPS é o consumo de água, uma vez que altos teores de água afastam mais as partículas entre si.

### 3.3 Componentes do concreto e sua influência na resistência e consistência

#### 3.3.1 Água

A água é um dos materiais mais importantes que compõem o concreto. Combinada com o cimento, a água dá início às reações de hidratação e formação dos cristais, que são responsáveis pelo endurecimento e resistência do concreto. Além disso, a quantidade de água influencia diretamente na consistência da mistura, uma vez que diminui o atrito entre os grãos, fornecendo coesão e consistência ao concreto [4].

A quantidade de água no concreto deve ser suficiente para que as reações de hidratação do cimento sejam completas. Segundo Neville, a relação mínima de a/c para que se atinja um grau de hidratação de 100% é aproximadamente 0,36, pois abaixo deste

valor o espaço disponível para acomodação dos produtos de hidratação não é suficiente [2].

Conforme a região onde se encontra e seu tipo de ligação, a água pode gerar diferentes influências no estado fresco e endurecido do concreto. Abaixo, serão estudadas as interferências da água na resistência e consistência do concreto, sendo um dos parâmetros de entrada mais importantes da nossa base de dados.

### **3.3.1.1 A água e a resistência mecânica do concreto**

A parte sólida do concreto é responsável pela sua resistência, havendo uma relação inversa entre ela e a porosidade. [4] Por sua vez, o volume de vazios capilares na pasta de cimento hidratada depende da relação água/cimento presente na mistura e do grau de hidratação do cimento. Por essa razão, podemos dizer que com um volume adicional de água, aumentamos a porosidade e diminuimos a resistência. A porosidade e a relação sólido-espaço estão exponencialmente relacionados à resistência e à porosidade do concreto.

Quando há água em excesso, haverá uma maior quantidade de vazios e, conseqüentemente, menor resistência. Além disso, haverá retração e fissuração do concreto no estado endurecido. Para não ultrapassar a quantidade de água necessária e manter uma boa trabalhabilidade do concreto, são usados comumente os aditivos plastificantes, estudados no capítulo seguinte. [4] Na imagem a seguir, tem-se a resistência em função da relação água/cimento:

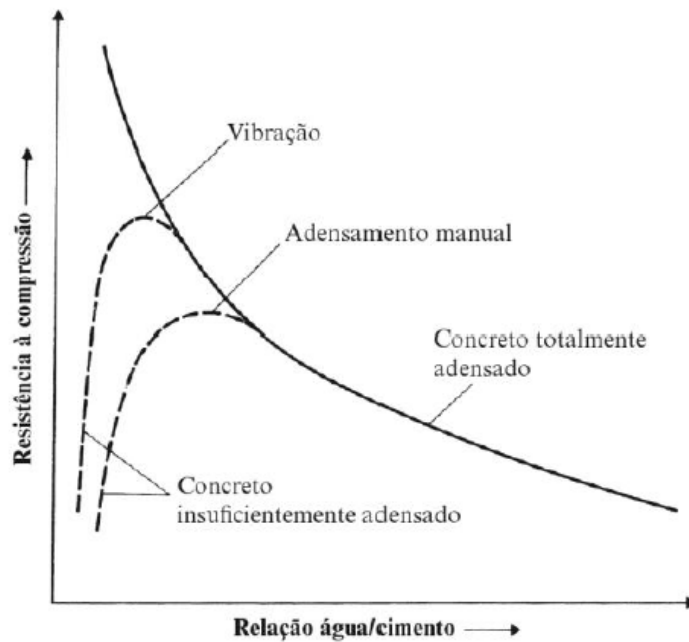


Figura 6: Relação entre a resistência e relação água/cimento do concreto. Fonte: [4]

Segundo Mehta & Monteiro e Neville, existe uma relação inversa e exponencial entre a resistência do concreto e a relação água/cimento. Através da Lei de Abrams é possível verificar que quanto menor a relação água/cimento, maior será a resistência mecânica do concreto, desde que respeitadas as quantidades mínimas de água demandada pelas reações de hidratação do cimento e um correto adensamento do concreto [4].

### 3.3.1.2 A água e a consistência do concreto

A consistência está diretamente ligada com a fluidez da pasta, que é aumentada significativamente com a adição de água, possibilitando uma maior mobilidade dos grãos presentes no concreto. Segundo A. M. Neville, quanto maior a relação água/cimento, mais fina será a granulometria necessária para uma maior trabalhabilidade [4]. Ela promove uma diminuição do atrito entre os grãos, garantindo uma maior facilidade de manipulação do concreto.

Um potencial problema que deve-se evitar é a adição de água ao concreto de forma a deixá-lo mais trabalhável. Isso pode ser feito desde que com cuidado, uma vez que a água em excesso pode diminuir a resistência e gerar futuras patologias ao concreto. Nesse contexto, surgem os aditivos, que melhoram a trabalhabilidade sem aumentar a proporção de água na mistura, sendo uma possível alternativa para melhorar essa característica. Estes serão discutidos mais adiante neste trabalho.

### 3.3.2 Agregados

#### 3.3.2.1 Influência dos agregados na resistência do concreto

Na avaliação das relações entre as propriedades dos materiais e a resistência do concreto, faz-se necessário o estudo da influência das características dos agregados.

A dimensão máxima do agregado, que, segundo a NBR 7211:2005 [14], é definida como a dimensão da abertura da peneira em que fica retido 5%, em massa, do agregado, tem influência na resistência principalmente de concretos com baixa relação água/cimento, ou seja, concretos de alta resistência, como pode ser visto na figura 7. [1] Apesar de maiores dimensões máximas de agregados proporcionarem concretos mais compactos, o que os tornariam mais resistentes, para uma certa quantidade de cimento, o aumento da dimensão máxima tende a reduzir a demanda de água na mistura [3]. Assim, fixando uma relação a/c, com dimensões máximas maiores do agregado, menor será a resistência do concreto, pois a quantidade de água estará acima da demanda. [1].

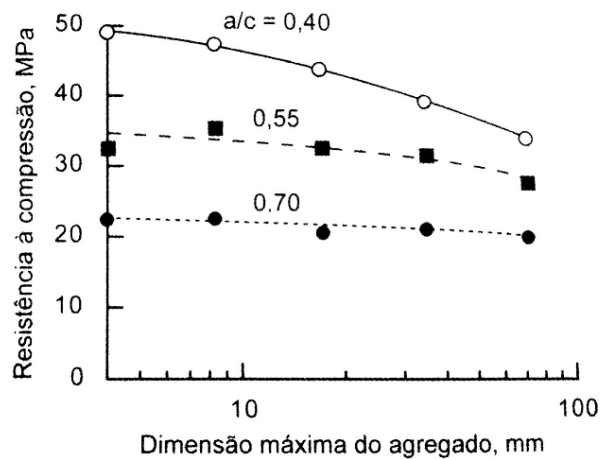


Figura 7: Influência da dimensão máxima do agregado na resistência do concreto para diferentes relações a/c. Fonte: Cordon, W.A.; Gillespie H.A., *J. ACI, Proc.* v. 60, n. 8 1963, apud [1]

O MPT também pode ser relacionado para se determinar a resistência do concreto. Larrard encontrou uma relação entre a resistência e o MPT (figura 8), mostrando que quanto menor for o MPT, maior é a resistência do concreto. Porém, se o MPT do concreto for muito alto, a variação do MPT tem um baixo impacto na variação da resistência, pela diminuição entre a relação a espessura das zonas de transição e a espessura total da pasta. [3]

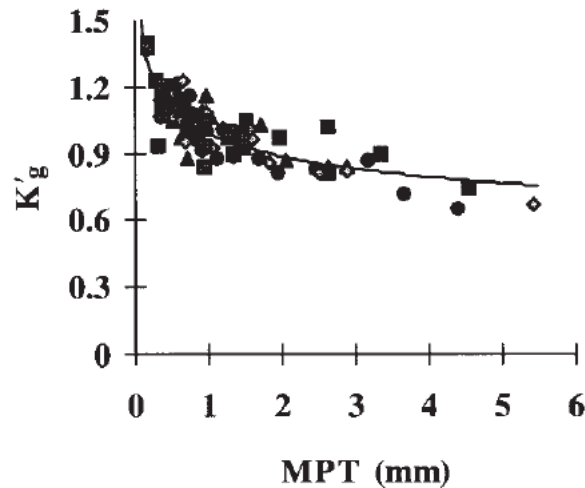


Figura 8: Relação entre a resistência (eliminando os efeitos da relação  $a/c$ ) e o MPT. Fonte: [3]

### 3.3.2.2 Influência dos agregados na consistência do concreto

Já sobre a consistência do concreto, os agregados tem um relação que pode ser mais facilmente percebida do que sua influência na resistência, pois o impacto é maior quando se varia suas propriedades.

Considerando-se a relação entre as partículas de agregados, a influência desta sobre a trabalhabilidade pode ser correlacionada ao MPT do concreto. Uma vez que o MPT é uma medida indireta do teor de pasta (o aumento do volume de pasta promove maior afastamento entre as partículas grossas), o aumento do MPT proporciona concreto mais fluidos. Mesmo com pastas de alta viscosidade, concretos com maiores valores de abatimento podem ser alcançados devido ao alto teor de pasta. [20]

Outro fator importante a ser observado são os vazios intergranulares entre os grãos dos agregados, devido ao seu empacotamento. Concretos que possuem agregados com boa distribuição granulométrica tendem a ter menos vazios entre eles, tornando necessário um menor consumo de pasta para se garantir uma mesma fluidez de concretos com muitos vazios intergranulares.[20] Portanto a distribuição granulométrica adequada é fundamental para que se atinja a trabalhabilidade desejada em uma mistura, avaliando tanto a relação agregado graúdo/agregado miúdo, como também a quantidade de partículas finas no agregado miúdo. [1]

Analisando as propriedades dos grãos dos agregados, um dos principais fatores que levam os agregados a terem papel fundamental na trabalhabilidade do concreto é a sua área específica, tornando importante o estudo das propriedades relacionadas a ela, como

o diâmetro, a forma e a superfície do grão.

Grãos mais finos, angulosos ou ásperos possuem maior área específica, o que eleva o consumo de pasta necessária e, conseqüentemente, torna o concreto mais plástico. Porém deve-se atentar à distribuição granulométrica utilizada na mistura, uma vez que o excesso de partículas finas torna o concreto com uma plasticidade acima do ideal para sua utilização, mas por outro lado, o excesso de partículas mais grossas faz com que o concreto seja mais áspero e com baixa trabalhabilidade. [1].

Apesar de na base de dados não haver diretamente as informações sobre a forma e a textura do grão, é mencionado se a areia utilizada era de origem natural ou artificial. Grãos de areias naturais, pelo seu processo de formação, tendem a ter forma mais arredondada e superfície mais lisa em comparação aos de areias britadas. Além disso, também há o dado de módulo de finura da areia e o do diâmetro das britas utilizadas na amostra, assim a correlação entre estes dados e as propriedades do concreto poderão ser analisadas, sendo o módulo de finura a soma das porcentagens de areia que ficam retidas em uma série de peneiras distintas, dividida por 100. A primeira peneira é a de N<sup>o</sup> 100, com abertura de 150  $\mu\text{m}$ , para as demais peneiras, a abertura é o dobro da anterior, até que não haja mais areia retida [1].

### **3.3.3 Temperatura da amostra**

O aumento da temperatura da amostra eleva a velocidade das reações de hidratação do cimento, o que leva a uma perda de abatimento em um tempo menor, tornando maior o consumo de água necessária para se garantir a mesma consistência no concreto. [4] A figura 9 exemplifica essa relação.

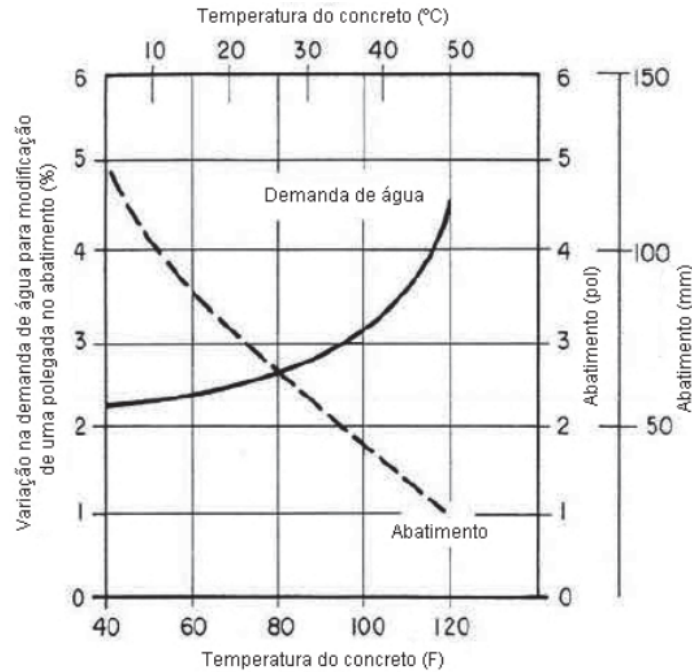


Figura 9: Influência da temperatura do concreto em seu abatimento. Fonte: KLIEGER, 1958 e ACI Committee 305, 2013, apud [5]

Pelo mesmo motivo acima, a resistência inicial do concreto aumenta com temperaturas maiores da amostra no momento da moldagem, como demonstrado na figura 10, exemplo em que a temperatura de armazenamento se mantém constante, já que este fator não será analisado, uma vez que na base não há este dado.

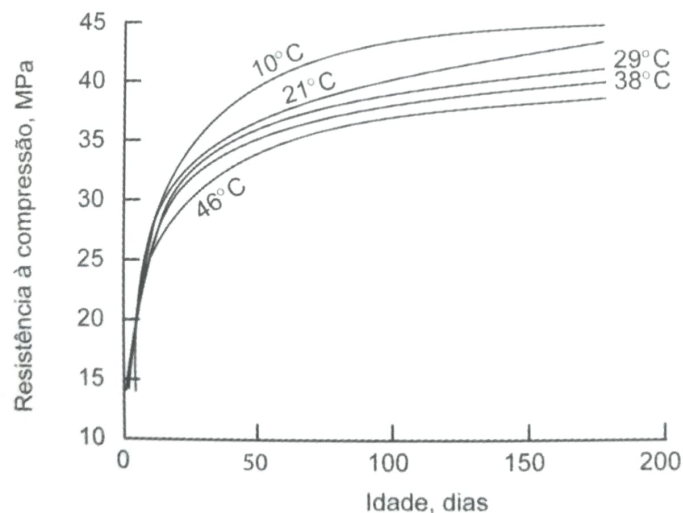


Figura 10: Influência da temperatura de moldagem na resistência inicial do concreto com razão água/cimento igual a 0,53 e temperatura de armazenamento constante igual a 21°C. Fonte: *Concrete Manual*, U.S. Bureau of Reclamation, 1975, apud [1]

Porém, a resistência final será maior quando a temperatura de moldagem for menor,

pois neste caso o concreto apresenta em sua pasta uma microestrutura mais uniforme do que quando esta temperatura é mais elevada [1].

### 3.3.4 Ar incorporado

A presença de ar incorporado nos concretos se deve a diversos motivos além do uso de aditivo incorporador de ar, o qual será discutido mais adiante. Entre estes fatores estão: a proporção de agregados miúdos em relação a quantidade de agregados graúdos, uma vez que as areias tendem a reter bolhas de ar durante o processo de mistura; a quantidade de materiais finos, como a sílica ativa, presente em parte dos concretos analisados neste trabalho; frações finas de areia, já que o aumento destes reduzem a quantidade de ar incorporado; e o processo de mistura, uma vez que aspectos como o tempo e a velocidade de mistura influenciam na quantidade final de ar incorporado (parte do ar é expulso em misturas muito demoradas ou lentas). Porém, em relação ao tempo de mistura, quando é feita em um período muito curto, há possibilidade de o aditivo não se espalhar totalmente, diminuindo sua eficácia. (DOLCH, apud [21])

Em relação à consistência do concreto no estado fresco, o aumento do volume de ar incorporado torna o material mais fluido ao aumentar o volume da pasta e tornar a matriz mais leve e coesa. No quesito resistência, o aumento de volume de ar incorporado leva a prejuízos nesta propriedade principalmente de concretos de alta resistência [1], ou seja, baixa relação água/cimento, como mostrado na figura 11, uma vez que torna o concreto mais poroso e aumenta o número de vazios [4]. Porém, em certos casos de concretos com baixa resistência, o aumento do volume de ar incorporado pode levar até a uma melhora na resistência, como pode ser observado na figura 12.

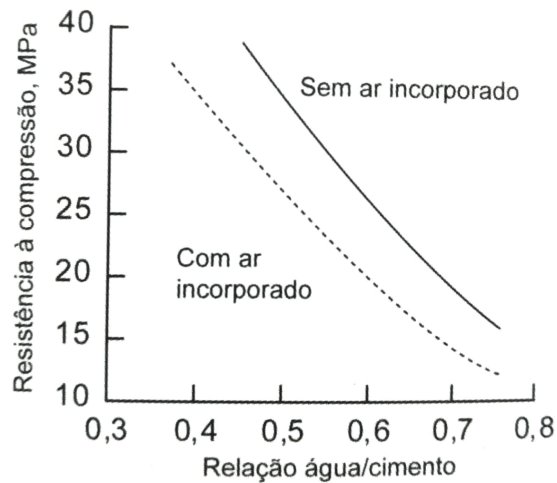


Figura 11: Influência do ar incorporado e da razão água/cimento na resistência do concreto. Fonte: *Concrete Manual*, U.S. Bureau of Reclamation, 1981, apud [1]

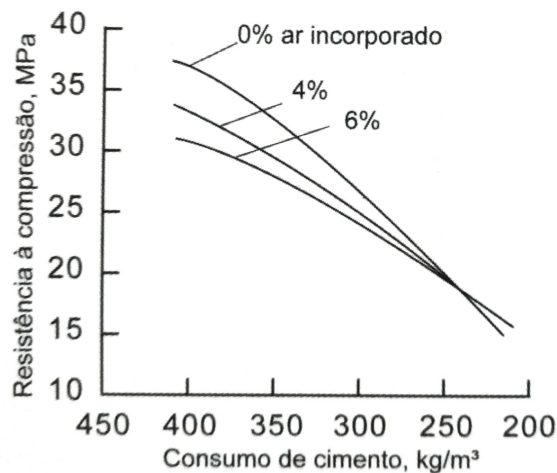


Figura 12: Influência do ar incorporado e do consumo de cimento na resistência do concreto. Fonte: Cordon, W.A., *Properties, Evaluation, and Control of Engineering Materials*, McGraw-Hill, New York, 1979, apud [1]

### 3.3.5 Sílica ativa

Na base há o dado do teor de sílica ativa utilizada em substituição a parte do cimento no concreto em análise. Segundo DAL MOLIN, no livro [4], a sílica ativa, por possuir grãos extremamente finos e com elevada área específica, aumenta o consumo necessário de água para se garantir uma mesma consistência, se comparado ao uso apenas de cimento, já que as reações de hidratação ocorrerem mais rapidamente.

Em um estudo realizado por GONEN e YAZICIOGLU [22], é demonstrado que a substituição de 10% de cimento por sílica ativa, apesar de diminuir a consistência do

concreto, eleva a resistência do material. Os principais motivos para este ganho são a diminuição da porosidade na pasta e o aumento das forças nas ligações químicas entre a pasta e o agregado.

### 3.3.6 Aditivos químicos

De maneira geral, uso dos aditivos surgiu com a necessidade de minimizar a quantidade de água e manter uma boa trabalhabilidade do concreto. As partículas de cimento, ao entrar em contato com água, possui a tendência de se aglomerar. Tais aglomerados podem interferir no empacotamento e influenciar na reologia das suspensões [15]. Dessa forma, os aditivos plastificantes e superplastificantes atuam na dispersão de tais aglomerados, interferindo nas características reológicas da suspensão e melhorando assim a trabalhabilidade da mistura. Já os aditivos incorporadores de ar produzem microporos que ajudam a se obter uma matriz mais leve, coesa, com menor módulo de elasticidade e que garante uma melhor trabalhabilidade ao concreto. Tais aditivos serão estudados mais detalhadamente nas próximas sessões.

#### 3.3.6.1 Aditivo plastificante em pó (APP), superplastificante (ASP) e hiperplastificante (AHP)

Esses aditivos são utilizados para reduzir a quantidade de água necessária para garantir uma certa trabalhabilidade. Olhando por outro lado, garantem uma maior trabalhabilidade ao concreto, mantendo-se a quantidade de água. São compostos por lignosulfonatos, sais de ácido hidrocarboxílico e polissacarídeos. Suas doses variam entre 0,3% a 0,6% da massa do cimento. [1]. Na tabela 1 a seguir, tem-se a dosagem de aditivos em função da redução de água e incremento de resistência:

<b>Tipo de aditivo</b>	<b>Redução de água</b>	<b>Dosagem típica</b>	<b>Aumento de resistência</b>
Plastificantes (P)	5 - 10%	0,2 a 0,5%	~ 10%
Superplastificantes (SP I e SP II)	15 - 40%	0,6 a 2,0%	~ 25%
Polifuncionais	8 - 18%	0,4 a 1,0%	~ 25%

Tabela 1: Classificação dos aditivos em função da redução de água, da dosagem típica e do incremento de resistência à compressão de concretos. Fonte: [1]

Esse tipo de aditivo é importante para garantir a trabalhabilidade desejada do concreto, sem ultrapassar o limite da relação/cimento necessária para a hidratação do cimento. Outra vantagem desse aditivo é a redução da quantidade de cimento sem modificar

a consistência do concreto. Com uma menor quantidade de cimento há uma diminuição da retração, da fluência, custos e ainda é um ponto positivo do ponto de vista ambiental.

### 3.3.6.2 Aditivo incorporador de ar (AIA)

Esse aditivo cria bolhas microscópicas de ar no concreto, melhorando a sua trabalhabilidade, aumentam a coesão, diminuem a segregação e também podem reduzir a exsudação [1]. São agentes tensoativos, concentrando-se na interface ar-água, produzindo bolhas de ar estáveis e uniformes, reduzindo a tensão superficial. Na figura 13 temos a relação entre a redução do consumo de água em relação ao teor de ar incorporado:

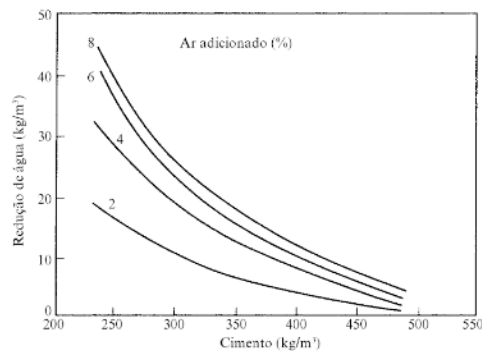


Figura 13: Redução na demanda de água de amassamento devido à adição de ar por aditivo incorporador de ar. Fonte: [4]

Esse aditivo facilita a produção de concreto leve, e facilita o bombeamento, melhora a coesão e o acabamento de concretos. [1]

### 3.3.6.3 Aditivo acelerador de pega (AA)

Esses aditivos aceleram a hidratação do cimento, aumentando a resistência do concreto nas primeiras idades. São divididos em dois grupos: sais solúveis inorgânicos e compostos solúveis orgânicos. Apesar de suas vantagens, deve-se tomar cuidado com o seu uso, podendo aumentar os riscos de retração por ou até degradação da armadura [4]. Segundo os mesmos autores, em dosagens altas, as alcanolaminas (composto solúvel orgânico) pode interferir na consistência do concreto, pois em doses elevadas aumentariam a concentração de aluminatos de cálcio nas fronteiras dos grãos de cimento. Isso afetaria a taxa de hidratação da alita, podendo também interferir na resistência mecânica.

### 3.3.6.4 Aditivo polifuncional (AP)

Estes aditivos são basicamente uma combinação dos anteriores. Reduzem a quantidade de água, diminui o consumo de cimento, permite o incremento do módulo de elasticidade e da resistência à compressão e aumento da durabilidade do concreto. Estão disponíveis no mercado através de vários fornecedores, possuindo características específicas para cada tipo de obra [23].

### 3.3.7 Dimensões do corpo-de-prova

Em relação às dimensões do corpo-de-prova, têm-se na base de dados as informações de suas alturas e diâmetros, as quais podem ser relacionadas à resistência do concreto.

Fixando a relação de altura/diâmetro do corpo-de-prova, observa-se que há uma diminuição da resistência ao se aumentar estas dimensões, como pode ser observado na figura 14 , onde fixa-se em 2 a razão altura/diâmetro. [1]

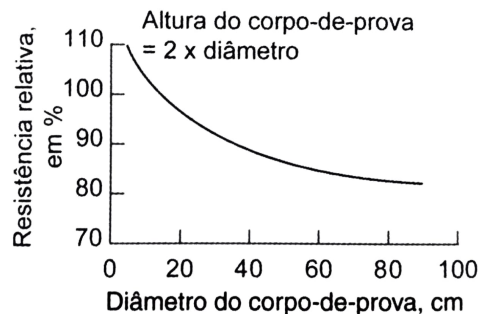


Figura 14: Influência do diâmetro do corpo-de-prova na resistência, com razão altura/diâmetro igual a 2. Fonte: *Concrete Manual*, U.S. Bureau of Reclamation, pp. 574-575, 1975, apud [1]

Já com a variação desta razão, tem-se que, em geral, a redução dela faz com que se aumente a resistência dos corpos-de-prova. Um dos fatores para que isso ocorra é que o aumento do diâmetro relativo faz com que o atrito entre a placa da prensa e o corpo-de-prova se intensifique [24]. A figura 15 mostra a comparação entre as resistências obtidas com corpos-de-prova com razão altura/diâmetro entre 0,5 e 4 e com razão igual a 2. [1]

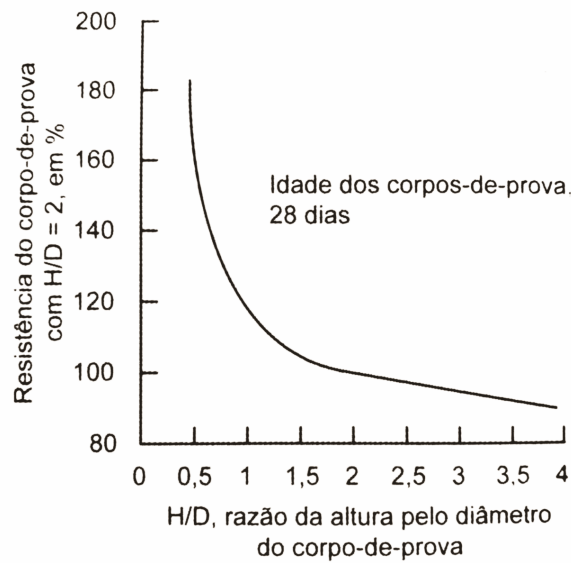


Figura 15: Influência da razão altura/diâmetro na resistência do corpo-de-prova. Fonte: *Concrete Manual*, U.S. Bureau of Reclamation, pp. 574-575, 1975, apud [1]

## 3.4 Ensaios de qualidade

Os ensaios de resistência e consistência feitos na obra seguiram as normas brasileiras e procedimentos detalhados nos tópicos a seguir.

### 3.4.1 Ensaio de abatimento (Slump Test)

”O Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone mede a consistência e a fluidez do material, permitindo que se controle a uniformidade do concreto” [25]. A consistência é um dos fatores que influencia na trabalhabilidade do concreto, relacionada a características inerentes a ele, como a mobilidade da massa e a coesão entre os elementos componentes. Ela também está ligada às características da obra, condições de transporte, lançamento e adensamento do concreto.

O ensaio de abatimento é regulamentado no Brasil pela norma *NBRNM67 (1998)* – *Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone*. Ele consiste no preenchimento de um tronco de cone em três camadas de igual altura. Cada camada é submetida a 25 golpes com uma haste padrão. Após a compactação da última camada, retira-se o excesso de concreto e deve-se alisar a superfície com uma régua metálica e retirar o cone lentamente. Após isso, deve-se colocar a haste sobre o cone invertido e medir a distância entre o topo do molde e o ponto médio da altura do tronco de cone de concreto moldado (abatimento).

”Misturas com consistência rijas têm abatimento zero, de modo que não se consegue nestes casos observar variações de trabalhabilidade. Já misturas ricas, como as comumente utilizadas nos concretos para a construção civil, podem ser aferidas satisfatoriamente com este ensaio” [25]. A tabela 2 traz relações entre a trabalhabilidade e o abatimento do concreto.

Trabalhabilidade	Abatimento (mm)
Abatimento zero	0
Muito baixa	5 a 10
Baixa	15 a 30
Média	45 a 75
Alta	80 a 155
Muito alta	160 ao desmoronamento

Tabela 2: Relação entre trabalhabilidade e grandeza de abatimento. Fonte: [2]

O abatimento é uma característica que depende do tipo de obra e da aplicação do concreto, sendo uma das especificações dadas ao se encomendar o produto na concreteira. Para cada aplicação, há um limite de abatimento recomendado, conforme a tabela 3.

<b>Limite de abatimento no Slump-test (adaptado de RIPPER, 1995)</b>			
Tipo de obra/serviço	Consistência	Concreto com controle razoável (agregados medidos em volume) e vibração manual ou mecânica	
		Mínimo (cm)	Máximo (cm)
Fundações e muros não armados	Firme	2	6
Fundações e muros armados	Firme a Plástico	3	7
Estruturas usuais e Lastros	Plástico	5	7
Peças com alta densidade de armaduras	Plástico a flúido	7	9
Concreto aparente	Plástico a flúido	6	8
Concreto bombeado a alturas até 40m	Flúido	8	10
Concreto bombeado a alturas > 40m	Muito flúido	9	13

Tabela 3: Limite de abatimento no Slump-test. Fonte: [9]

Após o concreto ser aceito através do ensaio de abatimento, deve-se coletar amostras para realizar o ensaio de resistência, através de moldagem de corpos de prova.

### 3.4.2 Ensaios de resistência

No Brasil, os métodos para a obtenção da resistência à compressão do concreto estão especificadas nos métodos de ensaio ABNT NBR 5738:2003 -Procedimento para moldagem

e cura de corpos de prova e ABNT NBR 5739:2007 -Concreto–Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Caso o parâmetro principal a ser atendido seja a resistência à compressão, esta deverá encaixar-se na classificação determinada pela ABNT NBR 8953:2009. [4] A figura 16 ilustra um ensaio de compressão de concreto realizado na Escola Politécnica da USP.



Figura 16: Ensaio de resistência à compressão de concreto com ruptura tipo coluna

Em alguns casos é importante obter a evolução da resistência à compressão com a idade, o que pode ser feito por meio de ensaios ou por meio analítico. Os ensaios de compressão comuns são os de 1, 3, 7 e 28 dias. A resistência característica refere-se à idade de 28 dias.

O ensaio de compressão é feito em corpo de prova cilíndrico que deve ser posicionado de modo que fique alinhado com a máquina, para que a resultante das forças passe pelo centro. Além da carga de ruptura, outro aspecto relevante é o tipo de ruptura (longitudinal, transversal, etc). [26].

## 3.5 Processo de Produção

### 3.5.1 Tipos de Concreto

Os concretos podem ser classificados de diversas maneiras, principalmente por critérios de resistência à compressão, fazendo a medição de seu  $f_{ck}$  pós 28 dias, denominando concretos de baixa, moderada ou alta resistência. Ou ainda de acordo com sua densidade, classificados em concreto leve, concreto normal ou concreto pesado. [27] Mas na base de dados de estudo deste trabalho, o tipo de concreto é determinado pela aplicação em obra, que classificam os concretos com maior detalhe dependendo do destino do material, como mostra na Tabela 4 abaixo. Para os dados em análise nesse projeto, temos ensaios de

concreto convencional (apenas lançado), concreto bombeável e concreto compactados a rolo (CCR).

TIPO	APLICAÇÃO
Rolado	Barragens, pavimentação rodoviária (base e sub-base) e urbana (pisos, contrapisos)
Bombeável	De uso corrente em qualquer obra. Obras de difícil acesso. Necessidade de vencer alturas elevadas ou longas distâncias
Resfriado	Peças de elevado volume como bases ou blocos de fundações
Colorido	Estruturas de concreto aparente, pisos (pátios, quadras e calçadas), guarda-corpo de pontes, etc.
Projetado	Reparo ou reforço estrutural, revestimento de túneis, monumentos, contenção de taludes, canais e galerias
Alta Resistência Inicial	Estruturas convencionais ou protendidas, pré-fabricados (estruturas, tubos etc.)
Fluido	Peças delgadas, elevada taxa de armadura, concretagens de difícil acesso para a vibração
Pesado	Como lastro, contrapeso, barreira à radiação (câmaras de raios-X ou gama, paredes de reatores atômicos) e lajes de subpressão
Leve (600 a 1200 kg/m <sup>3</sup> )	Elementos de vedação (paredes, painéis, rebaixos de lajes, isolante termo-acústico e nivelamento de pisos)
Leve estrutural	Peças estruturais, enchimento de pisos e lajes, painéis pré-fabricados
Pavimentos Rígidos	Pavimentos rodoviários e urbanos, pisos industriais e pátios de estocagem
Alto Desempenho (CAD)	Elevada resistência (mecânica, física e química), pré-fabricados e peças protendidas
Convencional (a partir de 20 MPa)	Uso corrente na construção civil
Submerso	Plataformas marítimas
Com fibras e aço, plásticas ou de polipropileno	Reduz a fissuração
Grout	Agregados de diâmetro máx. 4,8 mm

Tabela 4: Principais tipos de concreto dosado em central e suas características. Fonte: [10]

### 3.5.2 Etapas de Fabricação

As características dos materiais que compõem o concreto, assim como a forma que é executado o seu preparo e aplicação são os dados mais importantes que irão determinar seu desempenho. Sendo assim, todos os materiais são controlados previamente quanto a aspectos físicos e químicos seguindo as normas da ABNT.

Na produção do concreto para esta obra, a britagem dos agregados era feita na própria região, pois havia uma mineração próxima do local da obra. Assim que britados, os agregados eram separados por peneira de acordo com a granulometria necessária (brita

50mm, brita 25mm, brita 12,5mm e areia de britagem) e então transportados para o armazenamento. Deste local eles eram deslocados até a usinagem por meio de esteiras onde ficavam prontos para o processo de dosagem.

O cimento era produzido na própria região, mas recebiam o clínquer de outros lugares e faziam a moagem em uma planta só para isso, pois não havia uma indústria de cimento próxima ao local. O cimento chegava na obra em caminhões e ficava armazenado em silos. E então era transportado para o processo de dosagem também por meio de esteiras. Todo o armazenamento dos materiais devem ser feito em locais apropriados para não permitir mistura de componentes com diferentes propriedades [28].

A dosagem era controlada por um sistema com balanças automatizadas, onde era recebida uma ordem de produção que demandava uma quantidade específica de cada material. As esteiras que ligavam as pilhas de materiais até o processo de dosagem despejavam estes na balança até a quantidade exata e então o material seguia para o misturador. A dosagem é a etapa mais crucial para obtenção da proporção correta dos materiais, a qual a mistura resultante deve obedecer requisitos no estado fresco e endurecido. Simplificando, os requisitos básicos buscados em uma dosagem são: resistência mecânica, trabalhabilidade, durabilidade, deformabilidade e sustentabilidade [4]. Há uma recomendação referente à ordem de colocação dos materiais, da seguinte maneira: primeiro adiciona-se parte das britas e parte da água. Logo depois é colocado o cimento, o restante da água e a areia. E por fim o restante das britas [29].

O misturador era um cilindro horizontal que suportava aproximadamente cinco metros cúbicos de concreto, misturando os materiais com dois eixos compostos de diversas hastes que giram em sentidos opostos. Esse era um processo rápido, de aproximadamente um minuto. Logo em seguida era despejado em um caminhão betoneira para transporte até o local de aplicação. Todo esse processo era feito em ambas as margens (esquerda e direita), então o transporte do concreto até o local de aplicação era rápido. Neste trabalho serão analisados apenas os ensaios feitos com amostras da usina da margem esquerda. [29].

Para o transporte, a agilidade é indispensável, devendo ser feito o mais rápido possível, mantendo a homogeneidade, a fim de evitar a segregação dos materiais, uma vez que não é permitido o uso de concreto remisturado. Sendo assim, a velocidade de produção deve estar em linha com a velocidade de aplicação, para que o caminhão não fique esperando muito tempo para ser utilizado [29]. A única parada do caminhão betoneira entre o misturador e o local de aplicação do concreto era no local onde era feito o controle tecnológico, quando era colhido o material para moldar o corpo de prova para todos os ensaios ne-

cessários daquele lote, ficando ali em uma câmara úmida até o dia da ruptura. Os modelos de corpo-de-prova para esse ensaio podem ser cubos, cilindros ou prismas, mas no Brasil padronizou-se por norma o uso de cilindro com uma relação altura/diâmetro igual a dois, esse padrão foi seguido em quase todos os moldes de corpos de prova desse banco de dados[24] . A norma atual exige que as amostras sejam coletadas aleatoriamente durante a operação de concretagem e deve ser moldado dois corpos de prova do mesmo caminhão [28].

A produção do concreto foi feita em grande parte durante diversos turnos, o que explica a grande variação da temperatura ambiente que temos registrado do momento da retirada do material para corpo-de-prova. Também é importante ressaltar que as resistências das amostras em estudo nesse projeto foram calculadas com base em ensaios feitos com materiais coletados logo após a mistura, isto é, nenhuma divergência em relação à norma nas etapas posteriores será computada e/ou analisada aqui.

Apenas um caminhão por lote passava por essa etapa de ensaios de amostra, considerando que todos os caminhões do mesmo lote tenham as mesmas propriedades. Cada caminhão tinha um documento que indicava onde a carga seria aplicada, assim, se um lote fosse reprovado no ensaio, eles tinham controle de onde exatamente aquele concreto estava para fazer os devidos reparos.

### 3.6 Gestão da Qualidade

No controle das propriedades do concreto, principalmente a resistência e a consistência, as quais são os enfoques deste trabalho, faz-se necessário a gestão da qualidade dos materiais utilizados na construção desta obra.

A primeira medida adotada foi caracterizar as propriedades dos insumos previamente em laboratório externo especializado, localizado em Goiânia-GO, além de estudos de dosagens para os tipos de concretos fabricados.

Outras medidas adotadas foram:

- A melhoria na obtenção dos agregados, a fim de se reduzir o teor de finos, alterando a distribuição granulométrica;
- Adição de sílica ativa, reduzindo consumo de cimento, por aspectos térmicos e econômicos, além de melhorar a microestrutura do concreto;
- Utilização de aditivos novos, com estudos de comparação entre os possíveis fornece-

dores;

- Ensaaios inter laboratoriais para o cimento.
- Ensaaios com cada material, no laboratório da obra, para se avaliar a conformidade com as suas características previamente determinadas;
- Utilização de dispositivos gráficos, que tiveram significativo impacto na redução das dispersões dos resultados nos registros das pesagens;

Abaixo seguem os principais controles tecnológicos para o concreto (Tabela 5) e os ensaios regulares feitos com os materiais (Tabela 6).

<b>Controle tecnológico de materiais</b>
Concreto convencional - determinação da resistência à compressão (2 corpos/idade) com dimensões cilíndricas
Concreto convencional - determinação do módulo de elasticidade (2 corpos/idade) com dimensões cilíndricas
Determinação de absorção de água por imersão e fervura do concreto endurecido

Tabela 5: Controle tecnológico de materiais, Fonte: [11]

<b>Ensaaios Regulares do Controle realizados em laboratório externo - Goiânia</b>	
<b>Agregados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Determinação da massa específica e absorção</li> <li>- Composição granulométrica</li> <li>- Teor de material pulverulento</li> <li>- Agregado Miúdo – Determinação impurezas orgânicas húmicas</li> <li>- Determinação do Teor de argila em torrões e materiais friáveis</li> </ul>
<b>Cimento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Determinação da resistência à compressão da argamassa</li> <li>- Resíduo insolúvel</li> <li>- Análise química completa</li> <li>- Massa específica</li> <li>- Finura por meio do peneiramento aerodinâmico (# 200 e # 325)</li> <li>- Área específica</li> <li>- Tempo de início e fim de pega</li> <li>- Calor de hidratação</li> </ul>
<b>Aditivo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caracterização - Resíduo sólido</li> <li>- Caracterização - Densidade</li> <li>- Caracterização - pH</li> </ul>

Tabela 6: Ensaaios Regulares, Fonte: [11]

### 3.7 Referências normativas

Para estabelecer alguns requisitos de seleção de matérias-primas, preparo e qualidade do concreto, temos como referência algumas normas técnicas brasileiras. Para as análises

feitas nesse trabalho, consideramos que todos os materiais foram recebidos e verificados conforme as normas que citamos a seguir.

### **3.7.1 ABNT NBR 15900:2009 - Água para amassamento do concreto**

Essa norma é composta por 11 partes, com conteúdo relacionado a requisitos, coleta de amostras para ensaios, avaliação preliminar e análises químicas. Tais análises são importantes pois a presença de matéria orgânica na água prejudica a durabilidade do concreto e pode resultar em futuras patologias.

As águas devem ser ensaiadas segundo a norma ABNT NBR 15900-3. Nos ensaios, são verificados, por exemplo, o teor de cloretos, sulfatos e álcalis, além da presença de óleos e gorduras, detergentes, material sólido, ácidos, matéria orgânica e análise de cor. A figura 35, presente no anexo A, resume quais são as etapas de aceitação da água para amassamento do concreto.

Também é feito um estudo do tempo de pega da pasta preparada com a água ensaiada. O tempo não pode diferir em mais 25% do tempo de pega de uma pasta de cimento feita com água destilada ou deionizada. Uma comparação também é feita em relação à resistência de 7 e 28 dias dos corpos de prova feitos com a água ensaiada. Ela deve alcançar pelo menos 90% daquela atingida pela pasta de cimento feita com água destilada ou deionizada.

Dessa forma, concluímos que o uso de água de diferentes fontes só é adequado caso seja devidamente ensaiada e siga as especificações dessa norma. Tal cuidado é essencial, já que a água é um importante insumo do concreto. Com tais cuidados, garantimos que não haja interferência na qualidade final do produto.

### **3.7.2 ABNT NBR 16697:2018 - Cimento Portland - Requisitos**

Esta norma entrou em vigor em julho de 2018, substituindo algumas mais antigas e consolidando as informações. Ela especifica quais são os requisitos necessários para o recebimento do cimento Portland.

Uma das especificações da norma em questão é limitar as quantidades de cada componente do cimento, de acordo com os tipos. O cimento usado nessa obra foi o CP IV, e suas especificações encontram-se na tabela 12, presente no anexo A.

Se o cimento for granel, como no caso da obra em questão, deve-se checar o documento que acompanha a entrega. Nele deve conter a sigla, massa líquida de cimento, data de produção, prazo de validade e referência à esta norma. Outros requisitos são especificados nessa norma, sendo de classe física, mecânica e química. Nas tabelas 13 e 14, presentes no anexo A, há tais requisitos para o cimento CP IV.

Em relação à inspeção, cada lote deve ser representado por duas amostras, cada uma com cerca de 15kg cada, sendo iniciados acerca de 45 dias da extração da amostra [13]. Os cimentos devem ser ensaiados de acordo com a norma ABNT NBR 5741. Os ensaios devem seguir diferentes métodos especificados pela ABNT, de acordo com o tipo de análise, todos especificados na ABNT NBR 16697.

A aceitação do lote ocorre quando os resultados dos ensaios vão de acordo com as especificações dessa norma. Caso não seja aprovado, deve-se repetir o ensaio utilizando o exemplar que havia sido reservado. A reprovação do produto é automática quando o produto encontra-se contaminado, molhado ou tenha sofrido algum dano durante o seu transporte, necessitando de uma proteção contra as intempéries durante o trajeto. Deve-se sempre ficar atento ao prazo de validade e massa líquida do produto.

Outro requisito que deve ser analisado está relacionado às classes de resistência do cimento. Os ensaios devem seguir a ABNT NBR 7215, verificando a conformidade da resistência à compressão de acordo com as classes. O controle desses resultados é estatístico, e deve garantir que as os limites de resistência da classe sejam atingidos com uma probabilidade de 97%. Na tabela 15, presente no anexo A, temos os limites de resistência para o cimento CP IV.

### **3.7.3 ABNT NBR 7211 - Agregado para concreto - Especificação**

Primeiramente, o agregado é classificado de acordo com a sua granulometria. Quanto ao recebimento, os lotes devem vir identificados e contendo os seguintes dados: nome do produtor, origem do material, classificação granulométrica, massa, volume aparente e data do fornecimento. As especificações dos agregados devem ir de acordo com a norma ABNT NBR 7211, considerando os limites superiores e inferiores de massa retida acumulada, quantidades máximas de impurezas orgânicas e materiais pulverulentos e carbonosos, etc, todos descritos nesta norma. Para os limites granulométricos na qual os agregados devem respeitar estão expostos nas tabelas 16 e 17 do anexo A.

Além dos limites granulométricos, são impostos limites de substâncias nocivas em sua

composição. Isso é importante para que não haja interferência do agregado nas reações de hidratação do cimento, bem como o seu endurecimento e durabilidade. Encontramos os limites de substâncias nocivas nos agregados miúdos e graúdos, respectivamente, nas tabelas 18 e 19 do anexo A.

A análise dos grãos deve ser feita através dos métodos descritos na norma ABNT NBR 7389: 2009- Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto. Alguns ensaios adicionais podem ser feitos, de acordo com o tipo de obra e especificação do cliente. Quando a fonte do agregado corresponde à regiões litorâneas, de água salobra ou com suspeita de contaminação, deve-se também observar os limites de expansão devido à reação álcali-agregado e também os tetores de sulfatos e cloretos presentes nos agregados [14]. Tais limites encontram-se expostos na norma NBR 7211.

Para que um agregado seja recebido pelo consumidor, deve haver uma coleta das amostras, de acordo com a ABNT NBR NM 26 - Agregados - Amostragem. Elas devem ser ensaiadas em laboratório, podendo ser aceitas só se for de acordo com todas as especificações dessa norma e as possíveis prescrições especiais contratadas. [14]

#### **3.7.4 ABNT NBR 11768:2011 - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos**

Esta norma classifica os aditivos nos seguintes grupos:

- aditivo redutor de água/ plastificante;
- aditivo de alta redução de água/ superplastificante tipo I;
- aditivo de alta redução de água/ superplastificante tipo II;
- aditivo incorporador de ar;
- aditivo acelerador de pega;
- aditivo acelerador de resistência;
- aditivo retardador de pega;
- aditivo redutor de água e retardador de pega/ plastificante retardador;
- aditivo de alta redução de água e retardador de pega/ superplastificante retardador tipos I e II;
- aditivo redutor de água e acelerador de pega/ plastificante acelerador;

- aditivo de alta redução de água e acelerador de pega/ superplastificante acelerador tipos I e II;

Os requisitos gerais dos aditivos estão descritos na tabela 20 do anexo A.

Cada tipo de aditivo possui requisitos específicos. Serão contemplados aqui apenas os aditivos que foram utilizados na obra da barragem em estudo, os demais encontram-se detalhados nesta norma.

## 3.8 Redes Neurais Artificiais

Uma rede neural artificial (RNA) é um dos ramos da inteligência artificial em que a ideia básica é a simulação do córtex central do cérebro humano, onde informações são interconectadas e processadas através de elementos chamados neurônios artificiais (unidades). Assim como o cérebro humano, uma RNA aprende e toma decisões através da experiência. Uma RNA é, portanto, uma ferramenta que toma para si o poder de tomar decisões, que é adquirido através de treinamentos com dados de tipos similares. Estando treinada, uma rede neural artificial é capaz de tomar decisões através de cálculos feitos por seus neurônios artificiais, que tornam esta pequena simulação de um cérebro humano especialista em um determinado tipo de tarefa [30].

Uma importante característica desse tipo de inteligência artificial é a capacidade de melhorar sua performance e se adaptar às mudanças do ambiente, podendo gerar análises significativas, mesmo quando os dados processados possuem erros, ou estão incompletos [6].

### 3.8.1 Arquitetura de uma RNA

A Figura 17 mostra uma rede neural típica, que contém três camadas: a de entrada (input), a escondida, e a de saída (output). As *Multilayer Feedforward Neural Networks* (MFNN) são redes neurais nas quais as informações movem-se apenas para a frente, mas tem seus parâmetros atualizados através de um sistema de treinamento chamado de retropropagação (*backpropagation*).

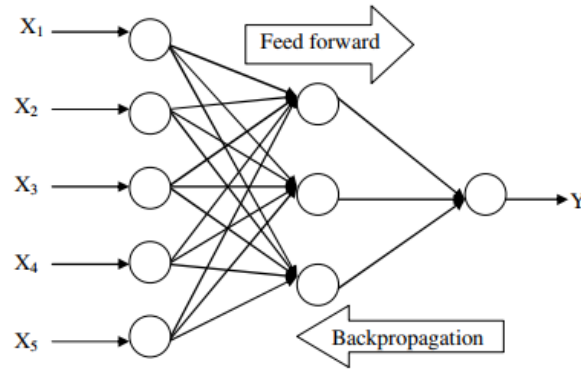


Figura 17: Arquitetura de uma rede neural artificial típica. Fonte: [6]

Cada neurônio na camada de input representa uma variável independente, os neurônios na camada escondida são responsáveis por calcular funções de ativação e passar os dados adiante, já cada um dos neurônios da camada de output calcula uma variável dependente de saída. Os sinais são recebidos na primeira camada (input), atravessam a camada escondida e chegam à última delas (output). Determinar a quantidade de neurônios na camada escondida é uma importante etapa do processo criativo de uma MFNN, pois caso haja poucas unidades, a rede será incapaz de aprender a função requerida, por ter graus de liberdade, já uma rede com muitos neurônios pode gerar redundâncias na análise, ou mesmo aplicar mais restrições do que o necessário, perdendo, assim, acurácia de generalização, ou aumentando o tempo de treinamento [6].

Cada conexão entre unidades tem um peso associado a ela e, além disso, há um peso especial ( $b_1$ ) que é associado a cada nó da camada escondida, e outro peso especial, chamado de  $b_2$ , que se associa a cada uma das unidades da camada de output. Esses pesos são os vieses (bias), e definem os valores limites para cada unidade [31]. A forma de analisar a influência dos vieses será abordada na seção de treinamento da rede.

### 3.8.2 Pré-processamento dos dados

Antes de se realizar o treinamento de uma rede neural artificial deve-se realizar o pré-processamento dos dados, que pode ser dividido em diversas etapas, dentre elas as seguintes: classificação de variáveis, tratamento de dados inconsistentes, escalonamento de atributos.

### 3.8.2.1 Classificação de variáveis

Uma variável é uma característica de interesse que pode ser medida na amostra analisada, tendo seus valores variando para cada um dos elementos, estas podem ser, ou não, numéricas. Ao se adquirir um certo conjunto de dados, deve-se classificá-lo, de forma a permitir o entendimento de seus valores pelo algoritmo da RNA. As informações são usualmente separadas em dois tipos: quantitativas ou categóricas (qualitativas), e cada uma dessas se divide em duas subcategorias.

Variáveis quantitativas são aquelas cujas características podem ser medidas em uma escala numérica que faça sentido, podem ser discretas ou contínuas. Discretas são aquelas cujos valores só fazem sentido se forem inteiros, por exemplo: número de pessoas trabalhando numa obra. As contínuas assumem valores presentes na reta real dos números, por exemplo: peso de areia, temperatura ambiente, volume de concreto.

Variáveis categóricas não possuem valores quantitativos, elas podem ser definidas por suas qualidades, são nominais ou ordinais. As nominais são aquelas cuja ordenação entre as categorias é irrelevante, por exemplo: marca de um cimento, destinação do produto. Entre as ordinais existe uma ordem específica para as categorias, por exemplo: estágio de uma obra (início, meio, fim). Vale ressaltar que certas variáveis qualitativas podem vir na forma de números, ao invés de descrever o sexo como masculino ou feminino, é possível chamá-los, por exemplo, de 1 ou 2, fazendo com que sejam representador por números, mas não se tornam variáveis quantitativas.

Categorizar os dados é, portanto, um passo muito importante para o funcionamento de uma rede neural.

### 3.8.2.2 Tratamento de valores inconsistentes ou faltantes

Uma das grandes dificuldades da área de aprendizagem de máquinas é que, muitas vezes, da forma que são coletados, os dados não podem ser diretamente aplicados nos algoritmos, precisando ser previamente tratados. Em geral, são necessárias correções em dados faltantes ou inconsistentes.

Um dado é considerado inconsistente quando não condiz com o contexto em que está aplicado, o que significa que provavelmente está incorreto. Um exemplo disso é o da massa de areia em determinado concreto, caso haja, nas informações sobre algum dos elementos da amostra analisada, massas negativas, fica claro que é necessário tratar esses valores antes de prosseguir com a aplicação da RNA. Podemos encontrar tais incorreções através

de algumas análises, dentre elas a univariada e bi-variada.

Após a classificação das variáveis (abordada anteriormente) em discretas, contínuas, nominais ou ordinais, separa-se as variáveis em dois tipos: preditores (input da RNA), e alvos (output da RNA), sendo assim possível o início das análises univariada e bi-variada.

No caso das variáveis quantitativas, para se realizar uma análise univariada, faz-se necessário o entendimento de sua tendência central e de propagação, através de métodos estatísticos de visualização métrica, como média, mediana, moda, valor mínimo, valor máximo, alcance, quartil, variância, amplitude interquartil, desvio padrão, assimetria, histograma [7], como mostrado na figura 18 abaixo:

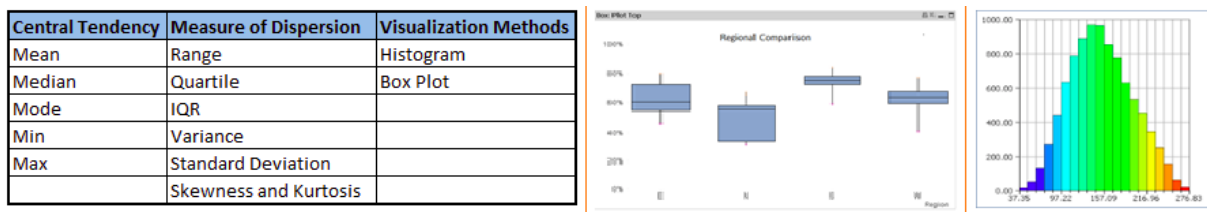


Figura 18: Da esquerda para a direita: tabela com métodos estatísticos para análise de tendência central, medidas de propagação, métodos de visualização; caixa de comparação estatística; histograma. Fonte: [7].

A análise univariada para variáveis categóricas é feita através da organização dos dados em tabelas de contagem, onde cada célula mostra quantas vezes um grupo foi categorizado de determinada forma.

Através das ferramentas estatísticas mostradas, é possível analisar e tratar variáveis, tanto quantitativas quanto categóricas, da forma que melhor se encaixar no problema.

Análise bi-variada baseia-se, como mostra o nome, na busca por uma relação entre duas variáveis, bem como na confiabilidade desse dado. Nesse tipo de método consegue-se combinar informações qualitativas e quantitativas em uma mesma análise.

A Figura 19 mostra a análise bi-variada entre duas variáveis quantitativas, são gráficos de dispersão que demonstram as correlações entre ambas as variáveis (relacionamentos lineares, não-lineares, ou sem correlação).

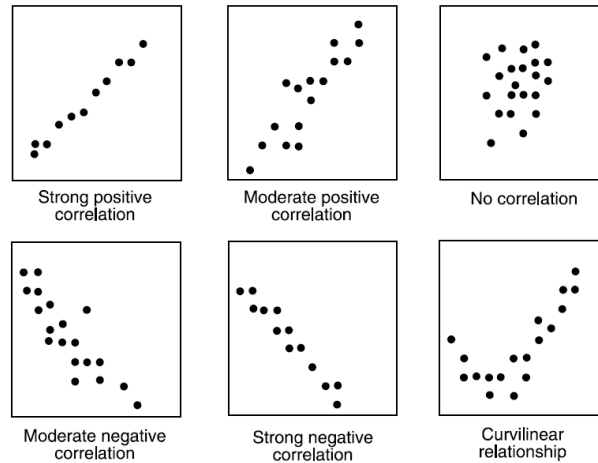


Figura 19: Gráficos de dispersão entre duas variáveis quantitativas. Nela há exemplos de correlações fortes e positivas (*strong positive*), fortes e negativas (*strong negative*), moderadas e positivas (*moderate positive*), moderadas e negativas (*moderate negative*), relação curvilínea (*curvilinear relationship*), e sem correlação (*no correlation*). Fonte: [7].

O cálculo da correlação entre duas variáveis ( $x$  e  $y$ ) pode ser feito através da equação 3.2, e seu valor pode variar de 1 (forte e positiva), a -1 (forte e negativa).

$$\text{Correlacao} = \text{Covariancia}(x, y) / \sqrt{x * y} \quad (3.2)$$

Análise bi-variada entre duas categóricas pode se dar através de um método chamado de teste do  $\chi^2$ , que determina a significância estatística do relacionamento entre variáveis, além de testar se a amostra é boa o suficiente para generalizar a correlação para todo o conjunto de dados. Esse teste é baseado na diferença entre valores esperados e frequências observadas de um ou mais tipos de dado. Seu retorno é a probabilidade da distribuição  $\chi^2$  com o grau de liberdade. Probabilidades iguais a 0 indicam que as variáveis são dependentes, menores que 0,05 indicam que possuem um relacionamento (com significância de 95%), e iguais a 1 mostram a independência entre elas [7].

Para iniciar os cálculos, é necessário, em primeiro lugar, criar uma tabela bidirecional, que organiza os dados sobre duas variáveis categóricas, sendo uma delas colocada nas linhas e a outra nas colunas, este tipo de análise permite resumir grandes quantidades de dados, agrupando os resultados em categorias [32]. A tabela 7 foi criada pelos autores a fim de demonstrar como funciona uma tabela bidirecional, nela são mostradas duas variáveis categóricas, o tipo de concreto (colunas) e, nas linhas, os intervalos da consistência "s" (intervalos em cm), os números representam as frequências em que cada uma das categorias se cruza, bem como os somatórios totais.

	<b>Concreto 1</b>	<b>Concreto 2</b>	<b>Concreto 3</b>	<b>Total</b>
$5 < s$	23	31	15	69
$5 \leq s < 10$	17	48	20	85
$s \geq 10$	41	13	39	93
Total	81	92	74	247

Tabela 7: Tabela bidirecional com duas variáveis categóricas: tipo de concreto e intervalos de consistência. Fonte: elaborada pelos autores

A expressão 3.3 demonstra o cálculo de  $\chi^2$ , onde O é o valor observado em cada uma das células da tabela, e E é o valor esperado, calculado através da expressão 3.4, em que TotalLinha é o total da linha de cada célula, TotalColuna é o total da coluna, e n refere-se ao tamanho total da amostra. Os graus de liberdade (eq. 3.5) dependem da quantidade de linhas e colunas (no exemplo da tabela 7,  $n = 247$  e, como há três níveis de tipos de concreto e três intervalos de consistência, considera-se 3 linhas e 3 colunas) [33].

$$\chi^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E} \quad (3.3)$$

$$E = \frac{TotalLinha * TotalColuna}{n} \quad (3.4)$$

$$GL = (Linhas - 1) * (Colunas - 1) \quad (3.5)$$

Tendo encontrado o valor de  $\chi^2$  e os graus de liberdade, deve-se comparar o resultado obtido com os valores da tabela 8, e verificar se há correlação entre as variáveis, e qual sua significância.

## Critical Values of Chi Square

df	0.05	0.01	df	0.05	0.01
1	3.84	6.64	16	26.30	32.00
2	5.99	9.21	17	27.59	33.41
3	7.82	11.34	18	28.87	34.80
4	9.49	13.28	19	30.14	36.19
5	11.07	15.09	20	31.41	37.57
6	12.59	16.81	21	32.67	38.93
7	14.07	18.48	22	33.92	40.29
8	15.51	20.09	23	35.17	41.64
9	16.92	21.67	24	36.42	42.98
10	18.31	23.21	25	37.65	44.31
11	19.68	24.72	26	38.88	45.64
12	21.03	26.22	27	40.11	46.96
13	22.36	27.69	28	41.34	48.28
14	23.68	29.14	29	42.56	49.59
15	25.00	30.58	30	43.77	50.89

Tabela 8: Valores críticos de  $\chi^2$  para cada uma das probabilidades, em função dos graus de liberdade. Fonte: [12]

A última análise bi-variada é entre variáveis quantitativas e categóricas, e dá-se através de diagramas de caixa para cada variável categórica, onde números pequenos indicam falta de significância estatística [7].

No caso de dados faltantes, pode-se optar por excluir esses elementos da amostra, ou introduzir novos com base nas análises estatísticas vistas anteriormente, caso haja significância entre diferentes variáveis, podemos estimar os valores faltantes sem prejudicar o desempenho da RNA.

### 3.8.2.3 Escalonamento de atributos

Como os diversos dados em uma base podem ter diferentes ordens de grandeza, na análise de produção de um concreto, por exemplo, a massa de areia (kg) e a temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ) teriam pesos diferentes na análise da RNA. É por isso que opta-se por escalonar todas as variáveis utilizadas, o que torna os pesos de todas as variáveis equivalentes para a rede. Uma forma de escalonar valores é através da padronização (eq. 3.6), que é a subtração do valor da variável ( $x$ ) pela média ( $m$ ), e dividir pelo desvio-padrão ( $s$ ) dos dados com a mesma caracterização, onde  $z$  é a variável padronizada. Essa forma de escalonamento corresponde a deslocar o centro do conjunto de dados para a origem do sistema cartesiano, e todos os desvios-padrão das novas variáveis serão 1, o que significa que fica muito simplificada a análise do conjunto padronizado [34].

$$z = \frac{x - m}{s} \quad (3.6)$$

Depois de classificados, tratados e padronizados, os dados estão prontos para que se inicie o treinamento da rede, que será abordado adiante.

### 3.8.3 Treinamento da rede

O treinamento de uma rede neural artificial é um processo iterativo, onde a rede recebe um exemplo, compara a saída (output) atual com a saída desejada (alvo), ajusta os pesos e vieses e, caso esteja funcionando corretamente, produzirá melhores outputs na próxima iteração. É por isso que uma rede deve ser treinada muitas vezes, ajustando seus vieses até valores que sejam confiáveis o suficiente para que a RNA possa tomar decisões por conta própria. O resultado esperado é que o algoritmo trabalhe bem não só com os dados que foram fornecidos durante o treinamento, mas com quaisquer variáveis com características similares que serão eventualmente inseridos na primeira camada da rede.

Os treinamentos funcionam como exemplos para a RNA, e têm a função de dizer a ela qual é a resposta correta (que é conhecida). Época é quando se treina uma rede com todos os dados de treinamento, são necessárias várias épocas para que os pesos sejam suficientemente ajustados e tenha sido criada uma função de predição eficaz [31].

#### 3.8.3.1 Algoritmo de retropropagação (*Backpropagation*)

O algoritmo de retropropagação (*backpropagation*) trabalha com diversas camadas (entrada, camadas escondidas e saída, como discutido anteriormente), e tem a capacidade de resolver problemas “não-linearmente separáveis”, que são aqueles em que não se consegue separar dois grupos distintos em um eixo cartesiano de duas dimensões utilizando apenas uma reta. Na figura 20 são mostrados dois tipos de conjuntos de dados, um linearmente separável (esquerda), e outro não linearmente separável (direita).

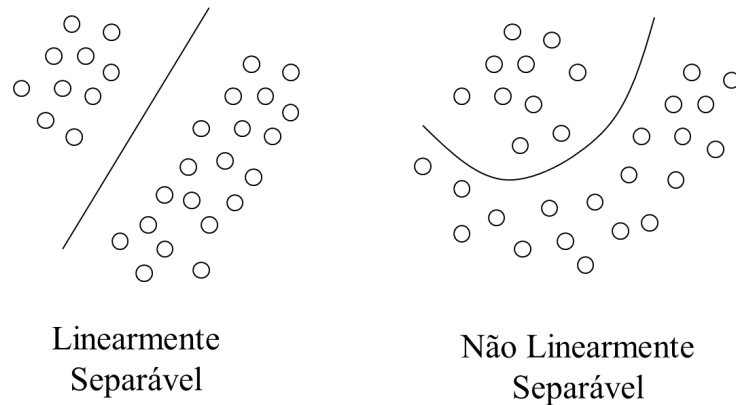


Figura 20: Visualização de conjuntos de dados linearmente separáveis e não linearmente separáveis. Fonte: [8]

Para as explicações seguintes, considerar-se-á como exemplo uma rede neural artificial simplificada (será chamada de Rede 1) que tenta prever a resistência e consistência de um concreto através de dados de massa de um aditivo específico, bem como relação água/cimento, levando em conta que há dados suficientes para o treinamento da rede.

A primeira camada é aquela que recebe os dados de entrada e possui um neurônio (unidade) para cada input, no caso da Rede 1, a entrada terá, portanto, dois neurônios (um para a massa de aditivo e outro para a relação água/cimento).

A decisão de quantas camadas escondidas (e quantos neurônios cada uma delas terá) é muito importante, e depende de experimentação e testes. Como abordado anteriormente, camadas escondidas com poucos neurônios podem ser responsáveis por resultados pouco eficientes, por não haver funções de ativação suficientes, enquanto uma quantidade excessiva de unidades pode gerar redundâncias, demora no treinamento ou falhas na generalização da rede (por possuir muitas restrições). Considera-se que foi adotada apenas uma camada escondida com duas unidades (valores que devem ser testados na implementação da rede neural artificial real, e talvez precisem ser alterados).

A camada de output possui um neurônio para cada tipo de output distinto, no caso da Rede 1, adotaremos duas unidades (uma para o valor da resistência e outra para a consistência).

A arquitetura da RNA de exemplo pode ser vista através da Figura 21, nela se nota a presença dos pesos referentes a cada uma das ligações entre unidades ( $w_1$  a  $w_8$ ) e, além desses, há vieses (bias) associados às camadas escondida e de output ( $b_1$  e  $b_2$ , respectivamente). Os valores dos pesos e vieses são iniciados aleatoriamente antes do treinamento da rede (geralmente valores entre zero e 1), e serão alterados durante as iterações do

processo de treinamento.

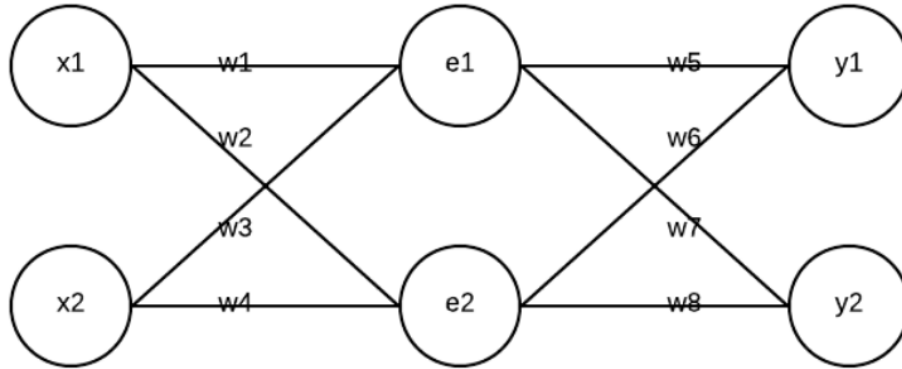


Figura 21: Rede Neural Artificial de exemplo (Rede 1) com uma camada de input ( $x_1$  e  $x_2$ ), uma escondida ( $e_1$  e  $e_2$ ) e uma de output ( $y_1$  e  $y_2$ ). Fonte: elaborada pelos autores

O primeiro passo da Rede 1 é o passo à frente (*forward pass*), onde as informações iniciais são passadas por todos os neurônios, até chegar à camada de output, calculando todas as funções de ativação (que serão explicadas adiante). A retropropagação se inicia nesse momento, onde começa uma comparação entre os valores obtidos pela rede e os valores esperados (através dos dados de treinamento).

Cada unidade possui uma função de ativação, que é baseada nos pesos e vieses associados a ela. A ativação da primeira camada é simplesmente o valor de input ( $x_1$  e  $x_2$ ), já a das camadas escondidas ( $e_1$  e  $e_2$ ) e de output ( $y_1$  e  $y_2$ ) podem ser calculadas com base na multiplicação dos pesos associados ao neurônio pelas ativações das unidades das camadas anteriores, somada ao viés da respectiva camada. Os exemplos das equações 3.8, 3.9 e 3.10 mostram os cálculos de  $e_1$  e  $e_2$  (i variando de 1 a 2), onde  $b_1$  é o viés associado à camada escondida e  $\sigma$  (eq. 3.7) é a função sigmoide, que é responsável por deixar o todos os valores num intervalo 0 e 1, balanceando os pesos de todos os nós.

$$\sigma = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (3.7)$$

$$z_{e1} = w1.x1 + w3.x2 + b1 \quad (3.8)$$

$$z_{e2} = w2.x1 + w4.x2 + b1 \quad (3.9)$$

$$ei = \sigma z_{ei} \rightarrow \frac{1}{1 + e^{-z_{ei}}} \cdot z_{ei} \quad (3.10)$$

Na camada de saída, para encontrar os valores de  $y_1$  e  $y_2$ , é necessário levar em conta os cálculos da camada escondida, os resultados são, portanto, mostrados através das equações 3.11, 3.12 e 3.13, onde  $b_2$  é o viés nessa camada.

$$z_{y1} = w5.e1 + w6.e2 + b2 \quad (3.11)$$

$$z_{y2} = w7.e1 + w8.e2 + b2 \quad (3.12)$$

$$y^i = \sigma z_{yi} \rightarrow \frac{1}{1 + e^{-z_{yi}}} \cdot z_{yi} \quad (3.13)$$

As ativações  $y_1$  e  $y_2$  são os palpites (padronizados, como visto na seção de tratamento de dados) da rede para a resistência e consistência, respectivamente. Nos dados de treinamento são apresentados alvos ( $t_1$  e  $t_2$ ), que são os valores esperados para os inputs específicos ( $x_1$  e  $x_2$ ) fornecidos. Agora é necessário o cálculo de uma função de erro total (eq. 3.14), que baseia-se nas diferenças entre os outputs e os alvos, onde  $N$  é o número de neurônios de output.

$$E_{\text{Total}} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (t_k - y_k)^2 = \frac{1}{2} ((t_1 - y_1)^2 + (t_2 - y_2)^2) \quad (3.14)$$

Tendo sido calculada a equação 3.14, inicia-se o passo para trás (*backwards pass*) através da derivada parcial do erro por cada peso e viés (gradiente). O que está se medindo, nesse momento, é a sensibilidade do erro a pequenas mudanças em cada um desses parâmetros, ou seja, a derivada em função de algum dos pesos determina o quanto este vai variar em relação a algum acréscimo ou decréscimo no peso, o mesmo vale para vieses. Esse procedimento é feito para descobrir quais parâmetros precisam ser alterados, a fim de minimizar essa função e obter melhores resultados em iterações futuras [35].

Estas derivadas são resolvidas através da regra da cadeia, a equação 3.15 mostra um exemplo de cálculo de uma destas diferenciais por  $w_5$  (ligado ao neurônio de ativação  $y_1$ ).

$$\frac{\partial E_{\text{Total}}}{\partial w_5} = \frac{\partial E_{\text{Total}}}{\partial y_1} \cdot \frac{\partial z_{y1}}{\partial w_5} \cdot \frac{\partial y_1}{\partial z_{y1}} = (t_1 - y_1) \cdot e_1 \cdot \sigma' \cdot z_{y1} \quad (3.15)$$

$$w_5 = w_5 - \eta \cdot \frac{\partial E_{\text{Total}}}{\partial w_5} \quad (3.16)$$

Depois de resolvida, a equação 3.15 nos mostra a sensibilidade de mudanças em  $w_5$  no erro total, o próximo passo é atualizar seu valor através da expressão 3.16, sendo  $\eta$  a taxa de aprendizagem, que determina quão rápido a RNA aprenderá em cada iteração. A escolha desse valor (que varia num intervalo aberto entre 0 e 1) é baseada em experimentações, valores menores podem fornecer melhor precisão, mas aumentam o tempo de processamento, enquanto  $\eta$  próximos a 1 melhoram a velocidade de aprendizado, mas

podem comprometer a precisão dos outputs da rede [36].

Utiliza-se equações similares a 3.15 e 3.16 para atualizar todos os pesos ligados a neurônios da camada de output, e as expressões 3.17 e 3.16 para se modificar o viés  $b_2$ .

$$\frac{\partial E_{\text{Total}}}{\partial b_2} = \frac{\partial E_{\text{Total}}}{\partial y_1} \cdot \frac{\partial z_{y1}}{\partial b_2} \cdot \frac{\partial y_1}{\partial z_{y1}} = (t_1 - y_1) \cdot \sigma' \cdot z_{y1} \quad (3.17)$$

A retropropagação prossegue agora para a camada escondida, atualizando da mesma forma todos os pesos e vieses dessa, tentando minimizar a função erro total e aprimorar o desempenho da nossa RNA. O objetivo é que, a cada iteração, o algoritmo esteja mais próximo de um resultado ótimo e, depois de muitos treinamentos, espera-se que a rede possa fazer previsões por conta própria, com um grau de confiabilidade aceitável.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Estimativa da Resistência

Os valores a serem estimados equivalem às resistências máximas dos concretos aos 28 dias. Para chegar a tais resultados, a rede neural calculou os pesos equivalentes de cada parâmetro do concreto em relação ao seu nível de influência na resistência. Para os parâmetros com maiores pesos, foram testadas suas correlações individuais com a resistência, com seus resultados apresentados ao final deste trabalho.

De forma a garantir uma maior correlação e, conseqüentemente, uma melhor estimativa da resistência dos concretos, foram calculadas as suas porosidades, com e sem ar incorporado. Uma variável importante utilizada nos cálculos (considerando ou não o ar incorporado) é o grau de hidratação do cimento, que não foi possível de ser calculado devido à ausência de alguns dados na base disponibilizada.

Sabe-se que o grau de hidratação dos cimentos a uma certa idade varia de acordo com o seu tipo e também pode ser influenciado pela presença de aditivos (acelerador ou retardador de pega, principalmente). Na base de dados utilizada não havia uma quantidade significativa de dados de resistência em outras idades, não sendo possível calcular curvas de hidratação média de forma a estimar mais precisamente o grau de hidratação alcançado aos 28 dias. Dessa forma, como na obra foi utilizado apenas um tipo de cimento (CP IV), foi adotado um grau de hidratação de 75% aos 28 dias.

Além da porosidade, foram testados também outros parâmetros de forma individual, como a relação água/cimento, o ar incorporado e os volumes de aditivos. Os efeitos do MPT na resistência também foram analisados, mas como foi atribuída uma maior importância para a sua influência na consistência dos concretos, ele será discutido na seção a seguir.

Como a base de dados que tivemos acesso não conta com alguns dados necessários para realizarmos alguns cálculos, contamos com a ajuda do nosso co-orientador Dr. Markus

Samuel Rebmann que, através de análises de outros bancos de dados dessa obra, nos forneceu alguns dados médios que foram adotados nos nossos cálculos. Tais dados são mostrados na tabela a seguir:

	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Área BET (m <sup>2</sup> /g)	VSA (m <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	Área granulométrica (m <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	Fator de forma
Cimento	2,93	4,6	13,48	1,13	11,9
Silica ativa	2,22	18	39,96	2,71	14,8
Finos britagem	2,66	1,64	4,36	0,4	10,8

Tabela 9: Grandezas consideradas nos cálculos da porosidade, MPT e IPS. Fonte: Valores estimados baseados em análises das bases fornecidas pela Eletrobras Furnas

## 4.2 Estimativa da Consistência

As principais variáveis avaliadas no estudo da resistência foram o MPT e o IPS. Para calcular o MPT, foi utilizada a base de granulometria dos agregados referentes à mesma obra, contendo as curvas granulométricas da brita 50, brita 25, brita 12,5 e areia. Como não havia uma forma de associar precisamente cada concreto ensaiado com suas respectivas curvas granulométricas, foram feitas as seguintes aproximações:

a) No ensaio granulométrico dos agregados foram utilizadas 9 peneiras (25,0mm; 19,0mm; 9,5mm; 4,8mm; 2,4mm; 1,2mm; 0,6mm; 0,3mm e 0,15mm). Para cada concreto da base foi verificada a data de sua produção e então selecionadas as curvas cujos ensaios de granulometria foram realizados neste mesmo dia. Como não se sabe ao certo quais ensaios correspondem aos agregados utilizados no concreto, foram feitas combinações entre todas as curvas desse dia, ou seja, diversas combinações contendo cada tipo de agregado (uma curva de brita 50, uma de brita 25, uma brita 12,5 e uma curva de areia).

b) Para cada combinação foi calculada uma curva granulométrica equivalente, de acordo com as porcentagens volumétricas de cada tipo de agregado na mistura. Com essas curvas equivalentes, foram calculados os parâmetros necessários para a obtenção do MPT. Com tais parâmetros calculados, chegou-se a um valor de MPT para cada combinação.

c) Com todos os valores de MPT calculados para o mesmo concreto, foi feito um tratamento estatístico. Como não há uma correspondência exata entre os concretos e as curvas granulométricas e o número de combinações entre as curvas é muito grande, foi decidido fazer tal tratamento estatístico de forma a atribuir maior confiabilidade às estimativas. Calculou-se um intervalo de confiança com 95% de significância, obtendo-

se três valores de MPT para cada concreto. Um valor médio, um equivalente ao limite inferior de 5% e outro para o limite superior de 95%. Para cada um desses grupos de dados gerados, foi testada sua correlação com a consistência, identificando assim qual deles seria o mais adequado para se trabalhar e obter estimativas mais precisas.

O cálculo do IPS foi feito de forma análoga, sendo feitas algumas considerações em relação aos finos do concreto, uma vez que esse controle não foi realizado na obra. Assim como foi falado no início desse capítulo, a análise feita com a ajuda do co-orientador desse trabalho nos possibilitou chegar a valores aproximados de densidade e área específica (VSA) do cimento, da sílica ativa e dos finos obtidos dos agregados. Além disso, foi considerada uma curva granulométrica média para cada um desses componentes, através da mesma análise de outros dados de Furnas. As curvas granulométricas dos finos seguiu o mesmo padrão das curvas dos agregados, com valores retidos acumulados em volume. Contando com esses valores e essas curvas, os cálculos foram feitos através das seguintes etapas:

a) Semelhante ao cálculo do MPT, para cada concreto foram feitas combinações entre todas as curvas granulométricas de agregados geradas nesse dia, ou seja, diversas combinações contendo cada tipo de agregado. Para cada combinação, foi gerada uma curva granulométrica equivalente (exatamente as mesmas curvas geradas para o MPT).

b) Com essa curva equivalente foi calculado o volume de finos, correspondente aos grãos que passaram pela peneira de 0,15mm. Na base de dados não continha informações sobre os materiais pulverulentos dos agregados. Por conta disso, foi considerado apenas os finos da britagem obtidos por peneiramento. Tendo esse volume, calcula-se a concentração de grãos finos na pasta ( $V_s$ ). O volume de ar incorporado foi desconsiderado no cálculo do volume da pasta.

c) A área superficial volumétrica dos grãos finos (VSA) foi calculada ponderando-se a área superficial do cimento CP IV, da sílica ativa e dos finos da britagem (presentes na tabela 9) pelos seus volumes na pasta.

d) O cálculo da porosidade entre os grãos finos foi feito de forma semelhante aos dos grãos grossos, calculada no MPT. Como utilizamos apenas uma curva granulométrica para cada um dos finos, os valores calculados de porosidade apresentaram-se constante.

e) Com todos os valores de IPS calculados para o mesmo concreto, por conta da variabilidade do  $V_s$ , foi feito um tratamento estatístico. Calculou-se um intervalo de confiança com 95% de significância, obtendo-se três valores de IPS para cada concreto. Um valor médio, um equivalente ao limite inferior de 5% e outro equivalente ao limite

superior de 95%. Para cada um desses grupos de dados gerados, foi testada sua correlação com a consistência, identificando assim qual deles seria o mais adequado para se trabalhar e obter estimativas mais precisas.

Outros parâmetros também tiveram sua correlação testada com a consistência. Entre eles, a relação água/cimento e os aditivos. Seus efeitos são melhores explicados no item de revisão bibliográfica.

## 4.3 Desenvolvimento do software

Para o desenvolvimento do programa, foi utilizada a linguagem de programação R, sendo o projeto dividido em duas frentes: a primeira, de importação e tratamento de dados, e a segunda, criação, treinamento e teste das redes neurais artificiais.

### 4.3.1 Importação e tratamento de dados

Os dados utilizados para a análise estão inicialmente na forma de duas planilhas de Excel fornecidas pela Eletrobras Furnas que contém, separadamente, as variáveis mostradas no anexo B, de aproximadamente 8 mil concretos da obra da UHE Santo Antônio, em Rondônia. Um dos campos da base informava o "tipo de concreto", que poderia ser comum, bombeável, ou compactado a rolo, sendo os últimos excluídos da análise por falta de informações a respeito desses.

Dados inconsistentes, como campos em que havia textos onde deveria existir números, ou erros aparentes de digitação foram excluídos ou modificados, de forma que se tornassem consistentes com as informações semelhantes.

Os campos "marca do aditivo", bem como o "tipo de concreto" foram convertidos em números, pois essa é a única forma em que as redes neurais conseguem interpretar e analisar os dados.

Nas bases, são fornecidos dados de resistências a 28 dias de 2 corpos de prova. Foram excluídos todos (aproximadamente 0,6% do total) os que possuem uma diferença maior que 5 MPa entre eles, considerando-se que alguma parte do procedimento de moldagem do concreto pode ter sido feita incorretamente, acarretando tamanha diferença. Foi utilizado nas análises o corpo de prova que apresentou maior resistência. Tal escolha foi feita de forma a trabalhar com a resistência potencial de cada concreto, já que conta-se com apenas dois corpos de prova para cada um deles. Finalizada a etapa de tratamento de

dados, restaram aproximadamente 6 mil concretos para a análise.

Importados e tratados os dados, iniciam-se os cálculos das porosidades, através de três métodos (com ar incorporado, sem ar incorporado e Neville), bem como do MPT e IPS de cada concreto.

### 4.3.2 Treinamento e teste das redes neurais

O primeiro passo para a confecção das redes neurais foi a criação de uma função que divide a base em duas partes (treinamento e teste), optou-se por uma taxa de divisão de 0.75, que significa que 75% dos dados serão (aleatoriamente) atribuídos ao treinamento das redes, enquanto os outros 25% serão os de testes, onde pode-se verificar a acurácia do modelo criado.

Nesse projeto, optou-se pela criação de redes neurais com apenas um neurônio na camada de saída, o que significa que todas as variáveis serão calculadas de forma a estimar somente um dos parâmetros alvo (consistência ou resistência) por vez. É necessária, portanto, a criação de pelo menos uma rede para cada alvo.

Para o treinamento da rede, especificou-se quais variáveis serão dadas como entrada. Foram escolhidos dois conjuntos de variáveis para cada treinamento, que são:

1. Tipo de concreto, diâmetro máximo, temperatura ambiente, ar incorporado, água, cimento, areia artificial, brita 12,5 mm, brita 25 mm, brita 50 mm, sílica ativa, marca do aditivo, aditivo incorporador de ar (AIA), aditivo superplastificante (ASP), aditivo hiperplastificante (AHP), massa unitária, módulo de finura e porosidades (não contando com a presença do ar incorporado, ou pelo método de Neville, onde não se ignora a presença do ar).
2. Água, cimento, areia artificial, brita 12,5 mm, brita 25 mm, brita 50 mm, aditivo incorporador de ar (AIA), aditivo superplastificante (ASP), aditivo hiperplastificante (AHP), massa unitária e porosidades.

As variáveis que não foram utilizadas em nenhum dos dois grupos de análise, ou possuíam muitas inconsistências, ou apenas valores nulos dentre os concretos analisados. Em alguns casos, as redes neurais artificiais foram feitas com conjuntos menores de dados de entrada, casos que serão mostrados e explanados na seção de resultados e discussões.

#### 4.3.2.1 Camadas escondidas e épocas

Para todos os modelos criados, foram escolhidas mil épocas (em cada treinamento, o cálculo é feito a partir todos os dados de treinamento mil vezes, antes de finalizá-lo), e quatro esquemas distintos de camadas escondidas (onde ocorre a maior parte dos cálculos da rede), enumerados a seguir:

1. Uma camada com 50 neurônios
2. Duas camadas, com 50 neurônios cada
3. Uma camada com 100 neurônios
4. Duas camadas, com 100 neurônios cada

Cada um desses quatro esquemas de camadas escondidas corresponde a uma rede neural distinta, que foi treinada e testada. O valor final da estimativa da consistência ou resistência de determinado concreto é encontrado através de uma média (ponderada pela correlação dos modelos) entre as estimativas de cada uma das quatro redes, excluindo-se o modelo de menor correlação, e todos os que possuem  $r^2$  (entre os valores estimados e esperados) menor que 65%. O resultado é, portanto, uma média ponderada entre as redes que apresentaram as maiores acurácias.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção, serão discutidos os resultados obtidos, tanto através de análises correlacionais simples entre duas variáveis, quanto as curvas de dispersão que mostram os resultados obtidos através da utilização das redes neurais artificiais (RNA). No último caso, os gráficos estarão na forma "resultados obtidos pela rede x resultados esperados", e contém um código de cores que mostra o erro percentual de cada estimativa.

### 5.1 Correlações entre os parâmetros e as variáveis calculadas

#### 5.1.1 Resistência

##### 5.1.1.1 Relação água/cimento

Para uma primeira análise, a variável testada na sua correlação com a resistência das amostras foi a relação a/c, obtendo-se os resultados demonstrados na figura 22.

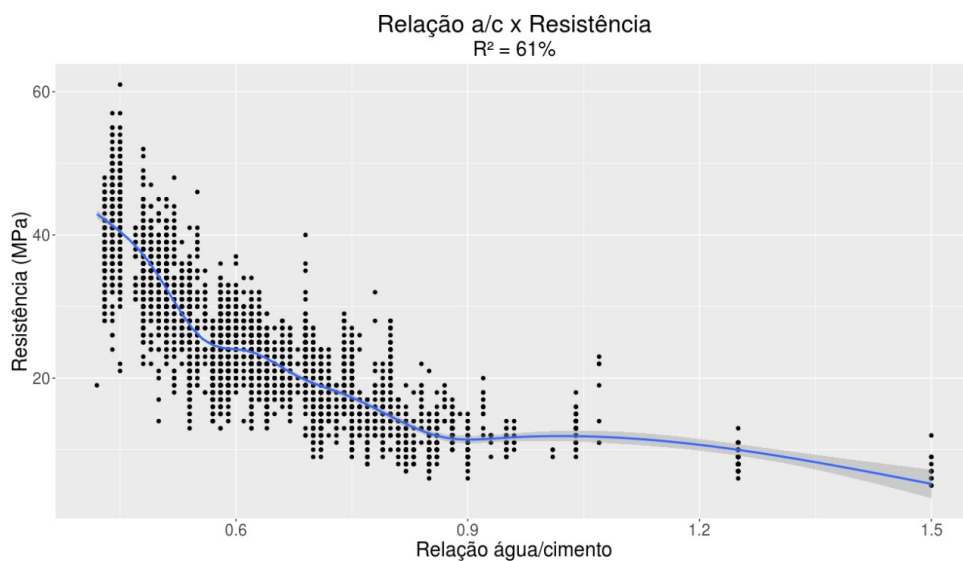


Figura 22: Gráfico de dispersão entre relação a/c e resistência. Fonte: elaborada pelos autores.

Apesar de o comportamento do gráfico ser o esperado pela teoria, com menores resistências para concretos com maiores relações a/c, seguindo a Lei de Abrams, a correlação apresentada foi de 61%. Portanto, apesar de esta relação ter influência no estudo da resistência, as análises feitas necessitam ir além de apenas esta variável. Como foi descrito neste trabalho, esta relação a/c será suporte para análise de uma variável mais importante nesta correlação, que é a da porosidade, com seus resultados demonstrados a seguir.

### 5.1.1.2 Porosidade

Para cada amostra da base de dados, foram calculadas as porosidades teóricas considerando o método de Mehta e Monteiro [1], sem considerar o ar incorporado, e o método de Neville, considerando-se o ar incorporado.

Com estes dados calculados, foi possível correlacioná-los às resistências máximas aos 28 dias das amostras. As figuras 23 e 24 demonstram as correlações obtidas através dos dois métodos.

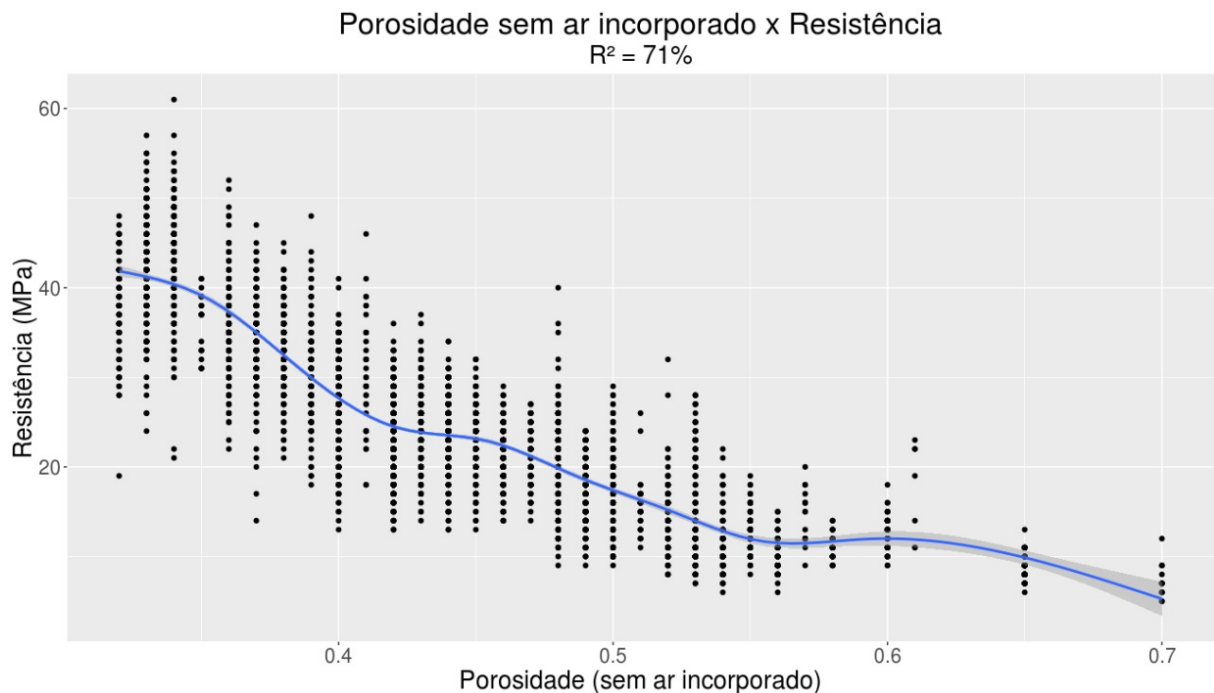


Figura 23: Gráfico de dispersão entre a porosidade (desconsiderando-se o ar incorporado) e a resistência. Fonte: elaborada pelos autores.

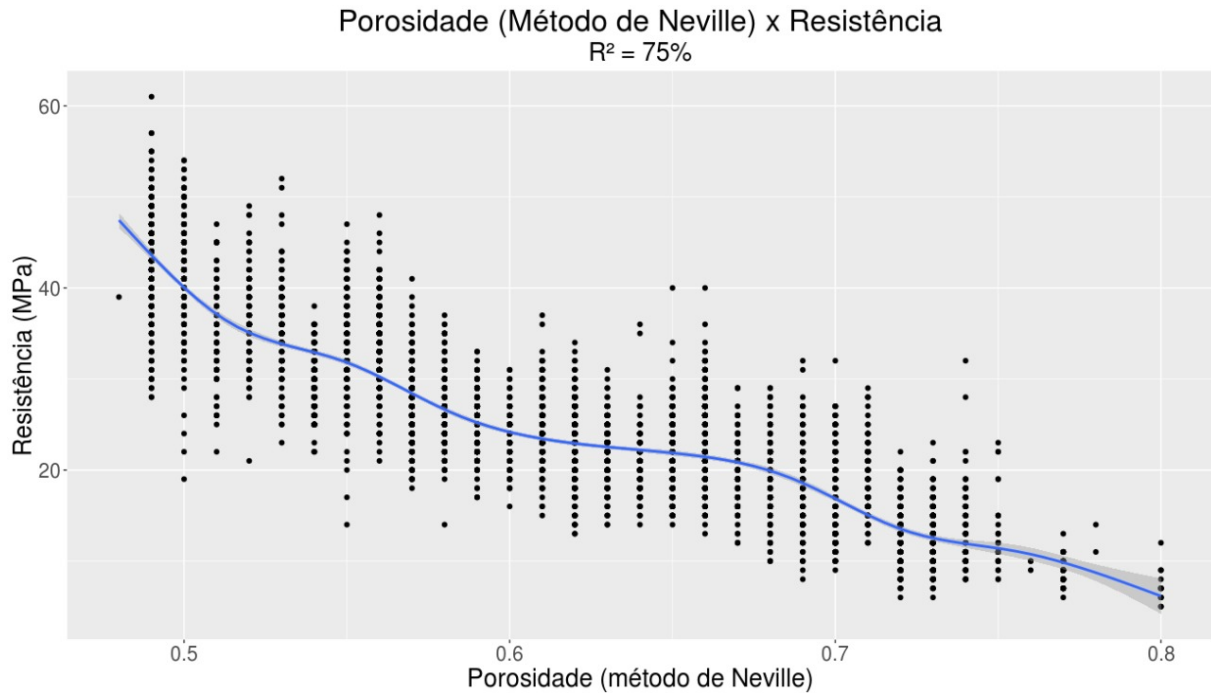


Figura 24: Gráfico de dispersão entre a porosidade calculada pelo método de Neville (considerando-se o ar incorporado) e a resistência. Fonte: elaborada pelos autores.

Para ambos os métodos, observou-se que o comportamento do gráfico apresentou resultados teoricamente consistentes: houve diminuição da resistência ao se aumentar a porosidade do concreto. Sem considerar o ar incorporado, a correlação obtida foi de 71%. Este resultado se apresentou ainda melhor ao se considerar o ar incorporado, pelo método de Neville, alcançando uma correlação de 75%.

Com esses resultados, confirma-se aquilo que foi dito na revisão bibliográfica. A relação água/cimento possui relevância ao se estimar a resistência, porém a porosidade é uma variável mais influente, ainda mais se nela for considerada o ar incorporado.

### 5.1.1.3 Temperatura ambiente e temperatura da amostra

Ambas as temperaturas não apresentaram correlação com a resistência da amostra. Apesar de não se esperar um resultado com alta correlação, o resultado de 0% para a temperatura da amostra se apresentou aquém do previsto, uma vez que o aumento da temperatura eleva a resistência inicial do concreto ao acelerar a velocidade das reações de hidratação.

#### 5.1.1.4 Ar Incorporado

Analisando-se apenas o ar incorporado na mistura, os resultados obtidos apresentaram uma correlação muito baixa com a resistência do concreto, com um valor de 2%. Porém, como mostrado anteriormente, ao se considerar o ar incorporado na porosidade total da amostra, a correlação foi maior do que quando considerada a porosidade sem incluir o parâmetro (71% sem considerá-lo x 75% ao considerá-lo), mostrando sua importância na estimativa da resistência.

#### 5.1.1.5 Maximum Paste Thickness (MPT)

O MPT que, no escopo deste trabalho, foi calculado para se correlacionar com a consistência do concreto, apresentou resultado acima do esperado também na estimativa da resistência. Utilizando como dados de entrada na rede neural o MPT e a massa de água, obteve-se uma correlação de 62% entre os valores estimados e os esperados de resistência, como mostrado na figura 25. Apesar de, na revisão bibliográfica, ter sido mostrado uma correlação de que o aumento do MPT ocasiona uma diminuição da resistência, não era esperada uma acurácia tão grande com a rede configurada com esses parâmetros.

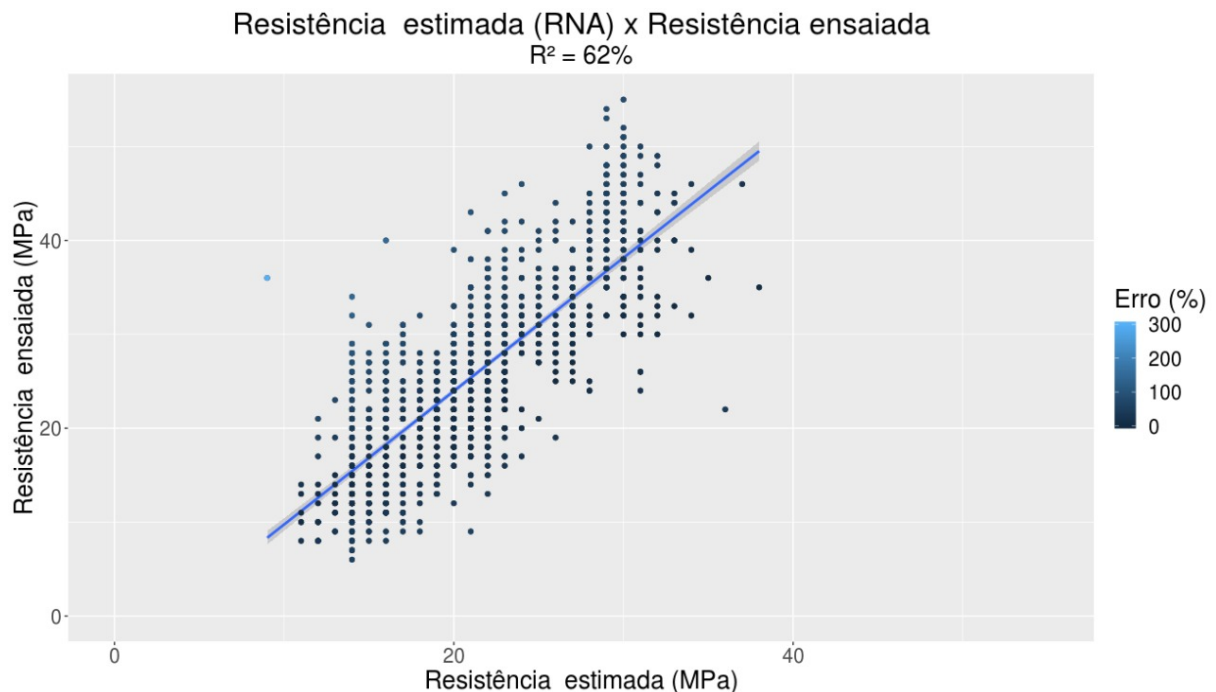


Figura 25: Gráfico de dispersão entre as resistências estimadas e ensaiadas, tendo como variáveis o MPT e a massa de água. Fonte: elaborada pelos autores.

## 5.1.2 Consistência

### 5.1.2.1 Agregados

As massas de agregados, como no caso da estimativa da resistência, ao serem utilizados como dados de entrada nas as redes neurais, apresentaram bons resultados na comparação entre os valores estimados e os esperados de consistências. Assim como mostrado na revisão bibliográfica, os agregados influenciam na consistência principalmente através de sua área específica, tamanho e formato dos grãos. A figura 26 apresenta a dispersão dos resultados da rede, que resultaram em uma correlação de 92%.

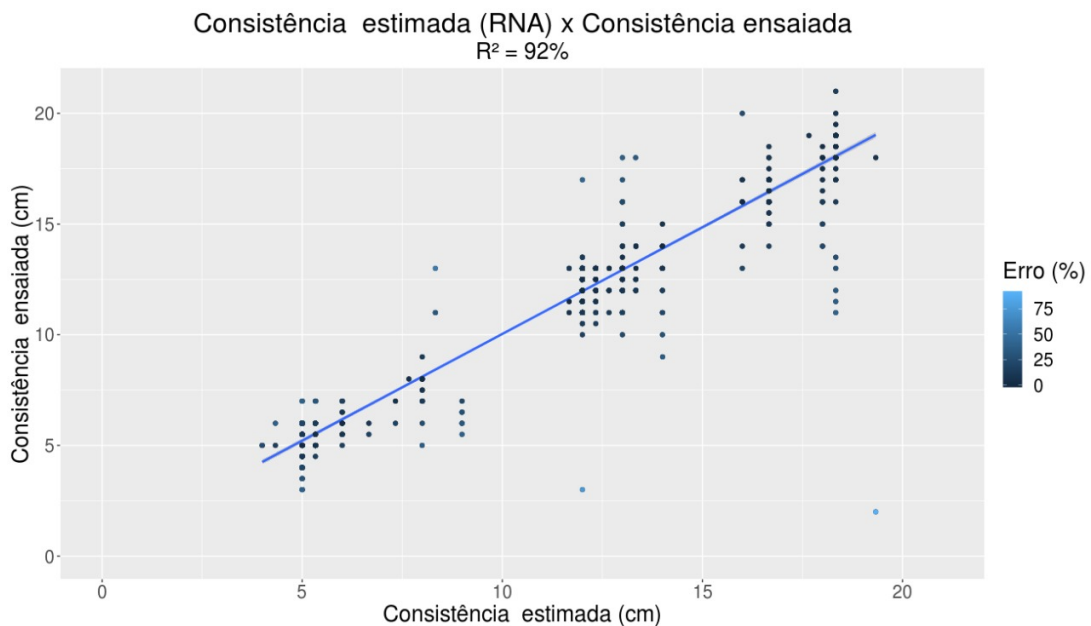


Figura 26: Gráfico de dispersão entre as consistências estimadas e ensaiadas, tendo como variáveis as massas de agregados. Fonte: elaborada pelos autores.

### 5.1.2.2 Aditivos

A função dos aditivos no concreto é melhorar a sua trabalhabilidade, agindo na mistura de diferentes formas, de acordo com o seu tipo/família. Uma primeira análise foi feita através das redes neurais com os dois aditivos da família dos plastificantes (AHP e ASP), resultando em uma correlação de 83% com os valores esperados de consistência. Seu gráfico pode ser visto na figura 27.

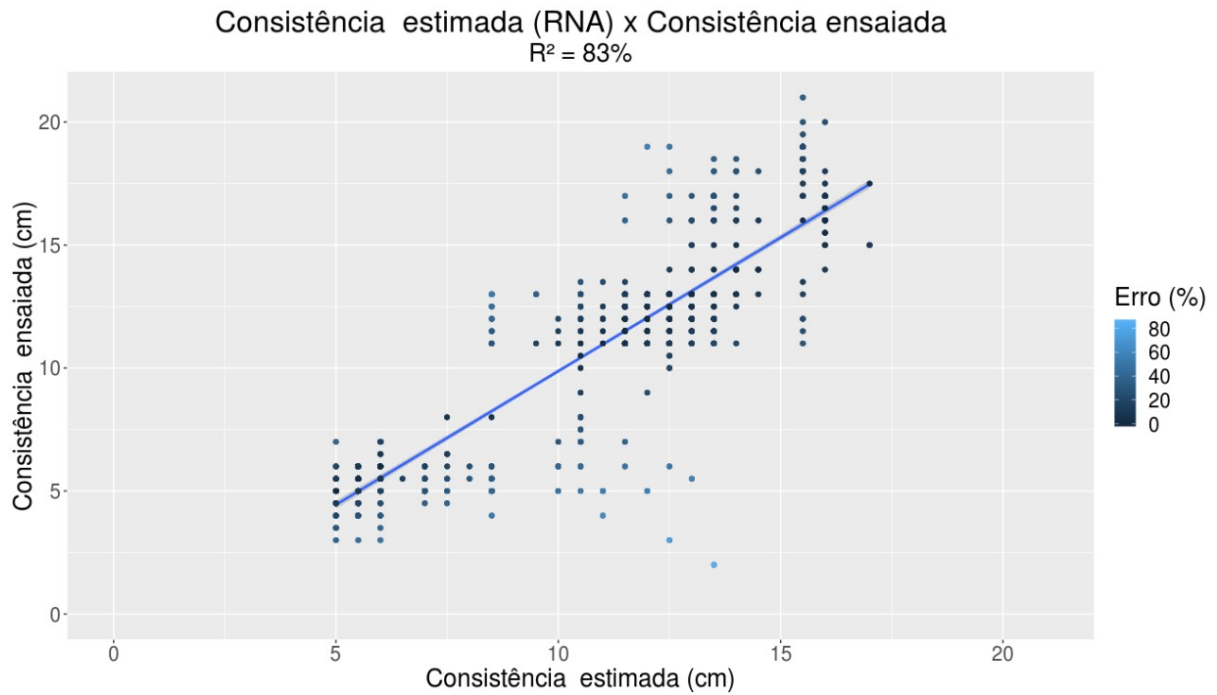


Figura 27: Gráfico de dispersão entre as consistências estimadas e ensaiadas, tendo como variáveis os aditivos da família dos plastificantes. Fonte: elaborada pelos autores.

Outra análise foi feita com o aditivo incorporador de ar (AIA), essa, porém, apresentou uma correlação direta de apenas 18%. Para melhorar esses resultados, foi gerado, através das redes neurais, um gráfico que relaciona os três aditivos (AHP, ASP e AIA) e o ar incorporado com a consistência, chegando a uma correlação de 88% (figura 28).

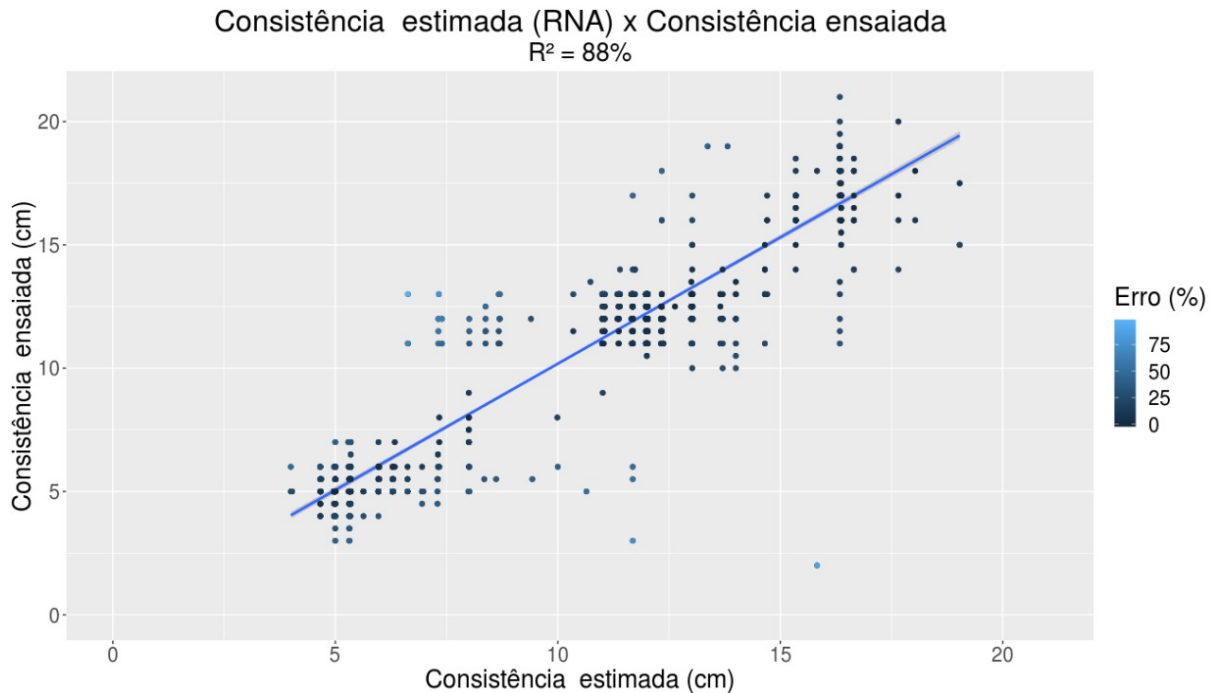


Figura 28: Gráfico de dispersão entre as consistências estimadas e ensaiadas, tendo como variáveis os três aditivos e o ar incorporado. Fonte: elaborada pelos autores.

### 5.1.2.3 Temperatura ambiente e temperatura da amostra

Os resultados obtidos da correlação entre a consistência e a temperatura ambiente foi de 0%. Entre a consistência e a temperatura da amostra também foi de 0%, ou seja, isoladamente tais temperaturas não influenciam na consistência do concreto.

### 5.1.2.4 Ar incorporado

O ar incorporado também foi analisado individualmente, de forma a avaliar a sua influência na consistência. O resultado foi uma correlação direta de 40%. Isoladamente não foi obtida uma correlação alta, mas juntamente com outras variáveis, como os aditivos apresentados no item anterior, seus resultados foram mais significativos.

### 5.1.2.5 Maximum Paste Thickness (MPT)

O MPT foi uma das variáveis consideradas mais importantes em relação à consistência. Porém, ao testar sua correlação com ela, chegamos a um resultado de apenas 19%. Isso pode ser explicado pelo fato de que o MPT, isoladamente, não consegue fazer tal estimativa, uma vez que não se conhece as características da pasta. As dispersões de MPT por consistência podem ser vistas na figura 29.

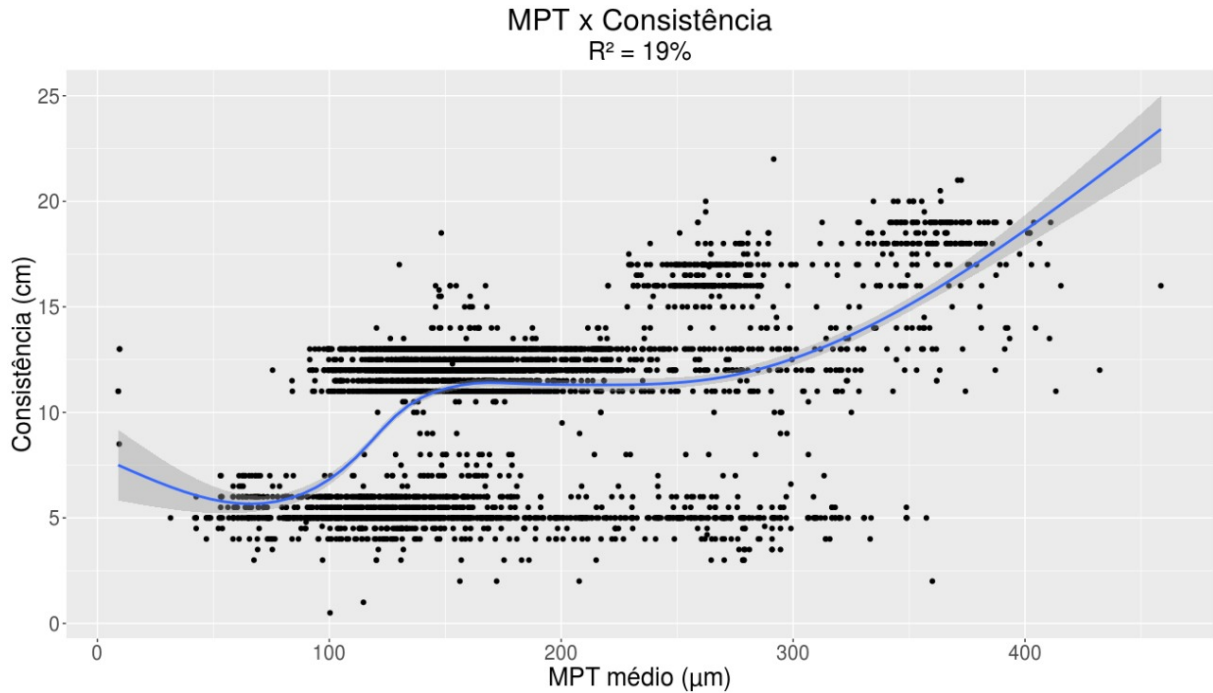


Figura 29: Gráfico da correlação entre o MPT médio e a consistência. Fonte: elaborada pelos autores.

A mesma análise foi feita para os valores de MPT mínimo (correspondente ao limite inferior de 5%) e máximo (correspondente ao limite superior de 95%). As correlações obtidas foram iguais a 20% e 18%, respectivamente, apresentando pouca diferença em relação à médio.

Para fazer uma análise mais completa, considerando as características da pasta, utilizou-se como dados de entrada para as redes neurais o MPT e o IPS, o resultado obtido, porém, foi de apenas 42% de correlação (valor estimado por esperado). Isso pode ser explicado pela falta de dados precisos dos materiais finos. Como os cálculos foram feitos utilizando apenas curvas granulométricas e áreas específicas médias, não chegamos a um resultado satisfatório. Dessa forma, para fazer tal análise, é necessário dispor de um controle de dados dos materiais finos (cimento, sílica ativa e finos originados da britagem dos agregados).

Mesmo sem ter sido possível realizar uma boa estimativa para o IPS do concreto, fez-se necessário avaliar este fator indiretamente, por meio da massa de água utilizada, sendo esta uma variável influente na fluidez da pasta. Assim, na tentativa de melhorar a correlação encontrada com o MPT e considerar a característica da pasta na análise, fez-se a estimativa da consistência utilizando o MPT e a massa de água juntos, apresentando uma correlação de 90% com a consistência esperada. Seu gráfico pode ser visto na figura 30. Foi obtido esse mesmo valor de correlação com os intervalos inferiores e superiores de

MPT (significância estatística).

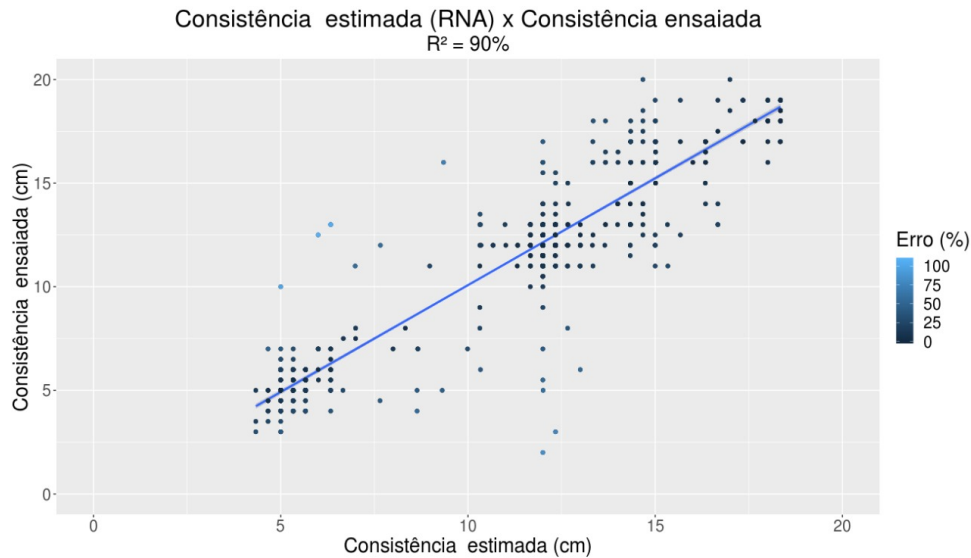


Figura 30: Gráfico de dispersão entre as consistências estimadas e ensaiadas, tendo como variáveis o MPT e a massa de água. Fonte: elaborada pelos autores.

De forma geral, foi possível observar que os resultados gerados pelas redes foram coincidentes com os conceitos explicados na revisão bibliográfica. A influência do MPT na mistura não foi significativa até introduzir na análise um parâmetro que caracterize a pasta (água). Dessa forma, há a confirmação de que a interação e proporção entre as fases do concreto (agregados e pasta) é de extrema importância para a estimativa da consistência. Esses resultados mostraram-se mais assertivos dos que os obtidos por De Larrard em seu estudo do MPT, por exemplo, confirmando que as redes neurais artificiais são ótimas ferramentas para poder estimar a consistência dos concretos.

## 5.2 Efetividade das redes neurais

### 5.2.1 Efetividade das redes na estimativa da resistência

Ao se utilizar uma maior quantidade de dados de entrada, calculou-se o peso que a rede neural atribuiu a cada variável para chegar à estimativa final (tabela 10).

Variável	Peso (%)
Brita125 (kg/m <sup>3</sup> )	8,1
Areia artificial (kg/m <sup>3</sup> )	7,2
Brita25 (kg/m <sup>3</sup> )	6,8
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	6,5
AHP (kg/m <sup>3</sup> )	5,7
Porosidade (sem ar)	5,5
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	5,4
Tipo de concreto	5,3
Água (kg/m <sup>3</sup> )	5,2
AIA (kg/m <sup>3</sup> )	5,1
Porosidade (com ar)	5,1
Marca aditivo	4,7
Módulo de finura	4,7
Ar incorporado	4,6
Brita50 (kg/m <sup>3</sup> )	4,5
Temperatura ambiente	4,1
Sílica ativa (kg/m <sup>3</sup> )	4,0
Dmax	3,8
ASP (kg/m <sup>3</sup> )	3,6

Tabela 10: Peso das variáveis do concreto para a obtenção da consistência. Fonte: elaborada pelos autores.

Como mostrado nas seções anteriores, foi chamada de efetividade a correlação entre os valores previstos através das redes neurais e os valores de resistência reais (obtidos experimentalmente e presentes na base de dados de Furnas).

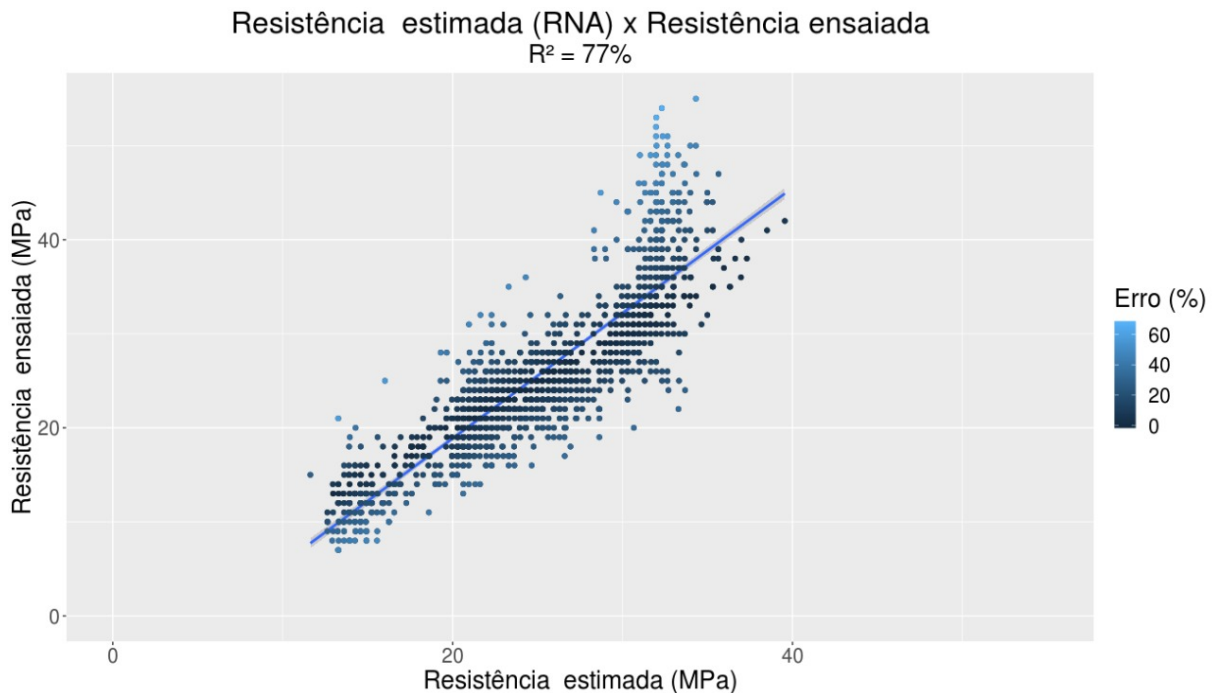


Figura 31: Gráfico da correlação entre resistências estimadas e resistências esperadas. Fonte: elaborada pelos autores.

Através do trabalho das redes, chegou-se a uma correlação de 77% entre eles. A dispersão dos dados pode ser observada na figura 31.

Uma quantidade muito grande de dados de entrada pode confundir a rede neural, e diminuir sua efetividade, pois essa pode atribuir algum peso maior que o devido a variáveis que não influenciam no resultado final. Para chegar a resultados mais efetivos, foram escolhidas algumas variáveis para compor uma nova rede neural, de forma a excluir alguns parâmetros que podem "confundir" o tratamento da rede. Tais variáveis escolhidas foram: água, cimento, areia artificial, brita 12,5 mm, brita 25 mm, brita 50 mm, aditivo incorporador de ar (AIA), aditivo superplastificante (ASP), aditivo hiperplastificante (AHP), massa unitária e porosidades (sem ar e de Neville). Os resultados obtidos estão ilustrados na figura 32.

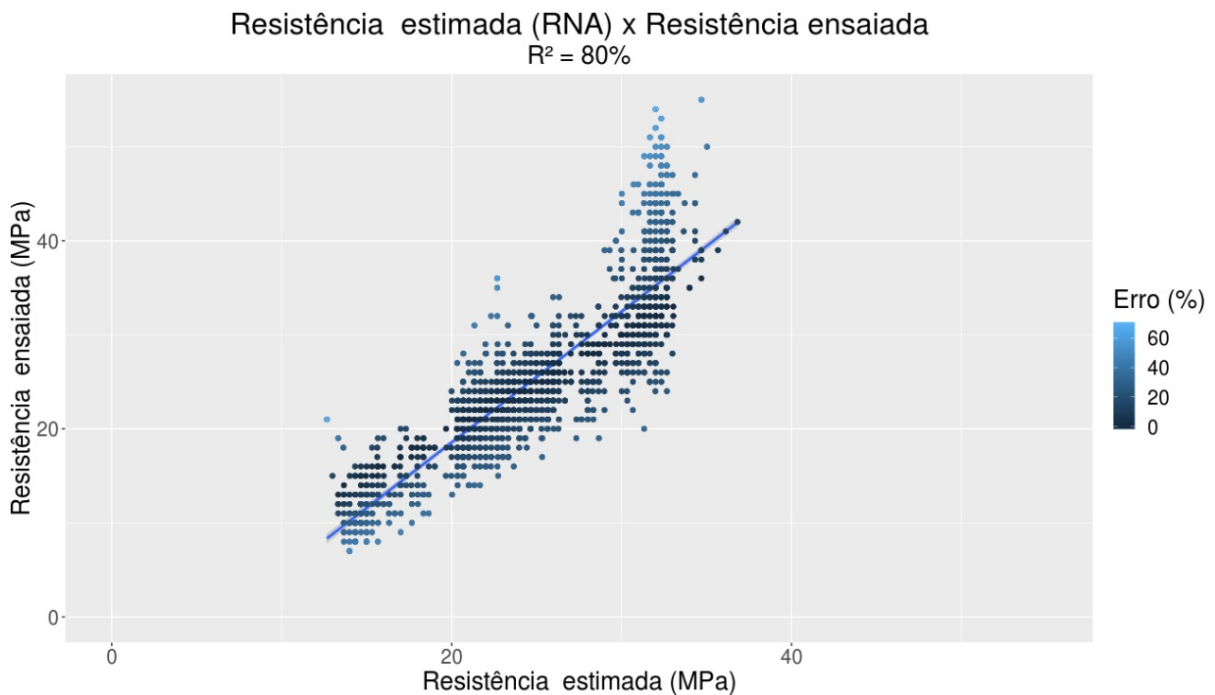


Figura 32: Gráfico da correlação entre resistências estimadas e resistências esperadas, utilizando apenas doze variáveis. Fonte: elaborada pelos autores.

Com essa rede, foi obtida uma correlação de 80%, mostrando-se mais eficaz do que a anterior, na qual foram utilizadas todas as variáveis. Acredita-se que, se houvesse um controle dos materiais finos, como suas curvas granulométricas e dados como área superficial e densidade, tal estimativa poderia ser mais assertiva. Talvez os tipos de dados disponíveis não tenham se mostrado suficientes para atingir uma correlação maior que 80%, uma vez que poderia ter sido feita uma análise mais refinada.

### 5.2.2 Efetividade das redes na estimativa da consistência

Como no caso da resistência, foram calculados os pesos das variáveis em uma RNA com muitos dados de entrada, para o cálculo da consistência (tabela 11).

Variável	Peso (%)
Sílica ativa (kg/m <sup>3</sup> )	6,7
AIA (Kg/m <sup>3</sup> )	6,6
Brita25 (kg/m <sup>3</sup> )	6,5
Temperatura ambiente	6,2
Areia artificial (kg/m <sup>3</sup> )	6,0
Dmáx	5,5
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	5,4
Brita125 (kg/m <sup>3</sup> )	5,2
Porosidade (sem ar)	5,0
Módulo de finura	4,8
ASP (kg/m <sup>3</sup> )	4,4
Tipo de concreto	3,9
AHP (Kg/m <sup>3</sup> )	3,9
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	3,7
Água (kg/m <sup>3</sup> )	3,6
Brita50 (kg/m <sup>3</sup> )	3,2
Ar incorporado	3,0
Porosidade (com ar)	3,0
Marca aditivo	2,8

Tabela 11: Peso das variáveis do concreto para a obtenção da consistência.

Da mesma forma que no caso anterior, a efetividade da rede foi medida através da correlação entre os valores estimados por essa e os esperados (fornecidos na base de Furnas). A figura 33 representa o gráfico obtido considerando as variáveis descritas na metodologia.

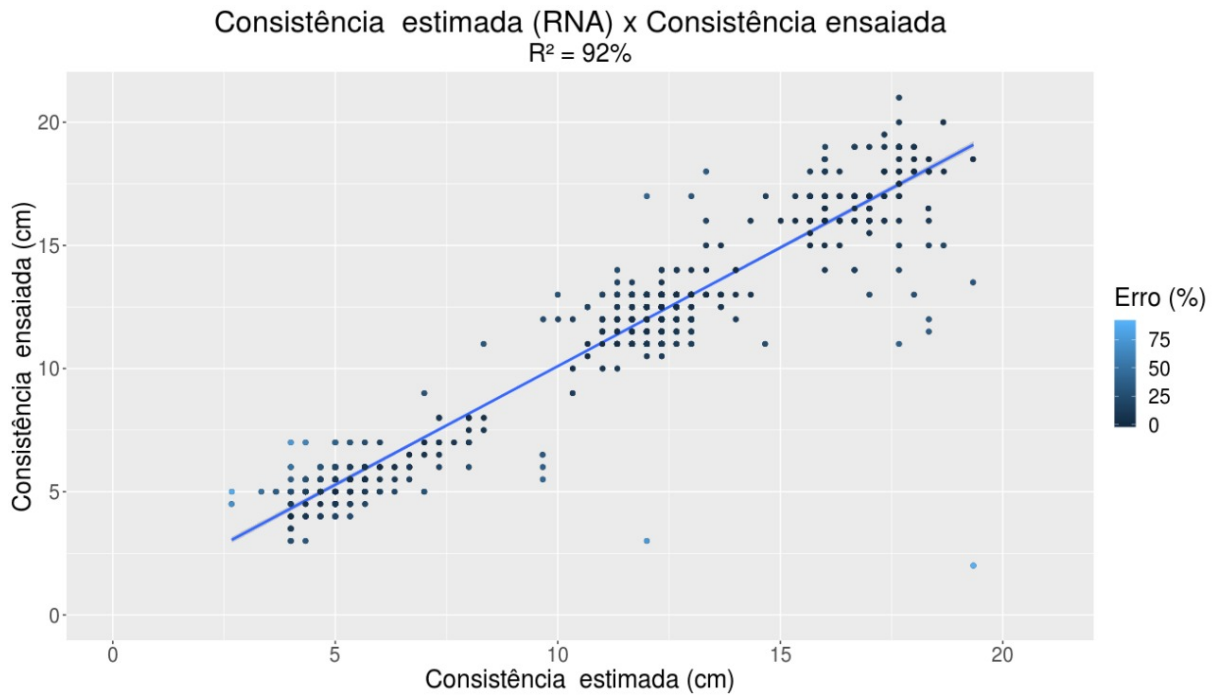


Figura 33: Gráfico da correlação entre consistências estimadas e consistências esperadas.  
Fonte: elaborada pelos autores.

Com essas redes, foi obtida uma correlação de 92%, mostrando-se assertivas mesmo utilizando a maioria das variáveis como dados de entrada.

Na tentativa de se obter um resultado ainda melhor, foram feitas outras redes com o mesmo grupo reduzido de variáveis especificado na resistência. Os resultados são apresentados na figura 34:

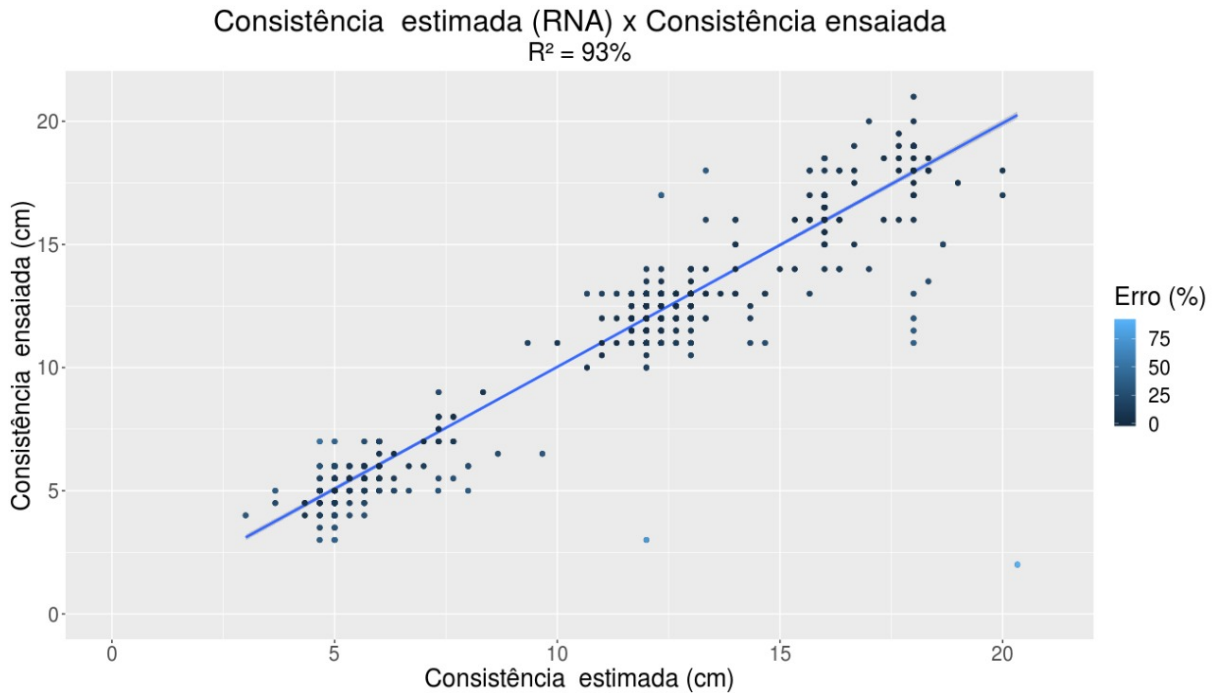


Figura 34: Gráfico da correlação entre consistências estimadas e consistências esperadas, utilizando apenas doze variáveis. Fonte: elaborada pelos autores.

Ao se diminuir a quantidade de variáveis, para a consistência, o resultado se mostrou aproximadamente o mesmo, apresentando 93% de correlação com o menor conjunto de dados de entrada (apenas 1% superior ao resultado anterior).

De forma geral, foi possível observar que os resultados gerados pelas redes foram coincidentes com os conceitos explicados na revisão bibliográfica. A influência do MPT na mistura não foi significativa até introduzir na análise um parâmetro que caracterize a pasta (água). Dessa forma, há a confirmação de que a interação e proporção entre as fases do concreto (agregados e pasta) é de extrema importância para a estimativa da consistência. Além disso, se a base de dados contasse com o controle dos materiais finos, o cálculo do IPS seria mais preciso, podendo chegar a resultados ainda melhores daqueles atingidos com a água e o MPT.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo a estimativa, tão precisa quanto possível, da consistência e resistência de concretos utilizados na obra de uma usina hidrelétrica. A base do projeto foi a criação de redes neurais artificiais, cujos parâmetros de entrada e saída são as variadas informações sobre esse material. Espera-se que, finalizada a presente dissertação, seja possível continuar pesquisando e aprimorando as formas de estimativa dos alvos analisados.

Esse estudo, desde a parte teórica, onde se buscou conhecer a fundo algumas propriedades, tanto do material quanto do processo de moldagem do concreto, até o desenvolvimento final das redes neurais artificiais, mostrou-se um passo importante para a continuidade das pesquisas relacionadas à estimativa das resistências e consistências do material pois, através da utilização dos modelos criados, conseguiu-se demonstrar algumas correlações altas, se comparadas ao cálculo desses parâmetros sem a utilização de modelos computacionais mais complexos.

Ao longo das tentativas de se encontrar redes neurais mais efetivas, mostrou-se necessário o cálculo de parâmetros que teriam maior interdependência com as propriedades analisadas. Munidos destas informações, os resultados encontrados foram, de maneira geral, fieis ao esperados após as revisões bibliográficas. Embora, em alguns casos, as correlações obtidas tenham sido abaixo das esperadas inicialmente, como o MPT (apenas 19% de correlação com a consistência, se analisado individualmente), estes apresentaram correlações altas ao unir parâmetros distintos na estimativa da resistência e consistência por meio dos algoritmos, sendo esse valor, por exemplo, aumentado para 90% quando analisado junto com a massa de água através do software criado. A melhor estimativa encontrada foi no cálculo da consistência, utilizando-se como dados de entrada na RNA

variáveis como: massa de água, cimento, agregados, porosidade, dentre outros, com uma correlação de 93% (valores estimados por valores esperados). Quanto às estimativas das resistências, os maiores valores encontrados foram da ordem de 80%.

A falta de controle de alguns parâmetros como, por exemplo, a granulometria dos materiais finos (cimento, sílica ativa e finos originados da britagem dos agregados) mostrou-se um entrave ao cálculo de variáveis que poderiam ser importantes para o aprimoramento dos modelos. Com poucos dados precisos sobre determinadas características do material, fizeram-se necessárias as adoções de aproximações, o que pode ter reduzido a acurácia das redes.

De maneira geral, foi possível alcançar bons resultados de estimativas, mostrando a eficácia da metodologia adotada. Conclui-se que, com a utilização das redes neurais, é possível calcular a consistência e a resistência de concretos a partir da dosagem dos materiais e suas características, dependendo, entretanto, da precisão e quantidade de dados fornecidos. Melhores resultados poderiam ser encontrados, portanto, com um maior controle das características do material, o que permitiria o cálculo das variáveis (como volume, porosidade, MPT e IPS) de forma mais precisa, tornando os dados fornecidos à rede mais próximos aos utilizados efetivamente nos corpos de prova, o que deve melhorar a acurácia do modelo.

## 6.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

As metodologias aplicadas neste trabalho possibilitaram criar redes neurais para correlacionar dados de uma obra em específico, mas podem ser aplicadas a outras bases de dados. Torna-se, então, possível refinar o modelo utilizado, a fim de aplicá-lo em casos mais genéricos, ampliando sua utilização para outros tipos de concreto. Além disso, outros dados podem ser incluídos nessa estimativa: um maior controle das granulometrias dos materiais finos, ou até mesmo das densidades dos agregados, que tiveram que ser aproximadas, pode refinar o cálculo de informações como a porosidade, MPT e IPS gerando, dessa forma, resultados mais precisos.

É sugerida, portanto, a continuação dos estudos utilizando o método de redes neurais artificiais para a estimativa dos parâmetros citados, utilizando-se outras bases de dados, sendo elas maiores ou mais precisas, a fim de construir um modelo genérico de estimativa das resistências e consistências de concretos.

## REFERÊNCIAS

- 1 MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*. [S.l.]: Ibracon, 2008.
- 2 NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto: Ciência e tecnologia*. [S.l.]: Bookman, 2009.
- 3 LARRARD, F. de. *Concrete mixture proportioning:: a scientific approach*. [S.l.]: E FN Spon, 1999.
- 4 CONCRETO: Ciência e tecnologia. [S.l.]: Ibracon, 2011.
- 5 NETO, T. F. C. Efeitos da temperatura do concreto fresco na sua trabalhabilidade. 2015.
- 6 JAMALALDIN, S. et al. Application of artificial neural networks to predict compressive strength of high strength concrete. *International Journal of the Physical Sciences*, v. 6, n. 5, p. 975–981, 2011. Disponível em: <http://www.academicjournals.org/IJPS>.
- 7 RAY, S. *A Comprehensive Guide to Data Exploration*. 2016. Disponível em: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2016/01/guide-data-exploration>.
- 8 VIEIRA, L. *Problemas não linearmente separáveis*. 2015. Disponível em: <https://i.stack.imgur.com/IL5y3.png>.
- 9 CUSTÓDIO, M. *Concretos: O concreto no estado fresco*. 2007. Disponível em: <http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17310/material/03.\%20Slump,\%20Massa\%20espec\%C3\%ADfca,\%20Moldagem\%20e\%20cura\%20de\%20CPs,\%20Capeamento.pdf>.
- 10 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM DO BRASIL: *Manual do concreto dosado em central*. 2007. Disponível em: <http://www.abesc.org.br/pdf/manual.pdf>.
- 11 GUIMARÃES A. P. B.; NASCIMENTO, J. F. F. B. A. S. Técnicas e tecnologias do concreto na UHE Santo Antônio. *Revista Concreto Construções: Tecnologia do concreto no projeto e construção de usinas hidrelétricas brasileiras.*, p. 97–105, Setembro 2011.
- 12 HYPOTHESIS Testing: Statistics and risk management. 2012. Disponível em: [http://jukebox.esc13.net/untdeveloper/RM/Stats\\\_Module\\\_4/mobile\\\_pages/Stats\\\_Module\\\_411.html](http://jukebox.esc13.net/untdeveloper/RM/Stats\_Module\_4/mobile\_pages/Stats\_Module\_411.html).
- 13 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos*. 2018.

- 14 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7211 - Agregado para concreto - Requisitos*. 2009.
- 15 CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. 2009.
- 16 LOW, M.-S. *Material flow analysis of concrete in the United States*. 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1721.1/33030>.
- 17 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738 - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto*. 2015.
- 18 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. 2018.
- 19 BONADIA A. R. STUDART, R. G. P. V. C. P. K. Aplicação do conceito de distância de separação interagregado (MPT) a concretos refratários de alta alumina. 1998.
- 20 DAMINELI, B. L. Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas. p. 237, 2013.
- 21 ROSA, P. Concreto com ar incorporado: variação das propriedades mecânicas em função do tempo de mistura dos materiais. p. 83, 2013.
- 22 GONEN T.; YAZICIOGLU, S. The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete. *Building and Environment*, v. 42, p. 3080–3085, 2007.
- 23 BASF. *Linha MasterPolyheed 100 - Aditivo plastificante polifuncional (mid-range)*. 2018. Disponível em: <https://www.master-builders-solutions.basf.com.br/pt-br/products/masterpolyheed/linha-masterpolyheed-100>.
- 24 HAMASSAKI L. T.; SANTOS, R. F. C. Corpos de Prova. *Revista Notícias da Construção, IPT*, p. 48–49, Novembro 2013.
- 25 GUERRA, R. S. de T. *Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone (Slump Test)*. 2013. Disponível em: <http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/08/ensaio-de-abatimento-do-tronco-de-cone.html>.
- 26 TEIXEIRA, P. W. G. N. *Materiais: Concreto e aço*. 2013. Disponível em: <http://www.lem.ep.usp.br/pef2604/TerceiraAulaPEF2604.pdf>.
- 27 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12655: Concreto - Preparo, controle e recebimento*. 1996. 1996.
- 28 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7212 - Execução de concreto dosado em central - Procedimento*. 2012.
- 29 NETÚLIO, F. A. Processo de Produção do concreto. 2013. Disponível em: [http://netulio.weebly.com/uploads/9/0/6/6/9066781/processo\\\_de\\\_produo\\\_do\\\_concreto.pdf](http://netulio.weebly.com/uploads/9/0/6/6/9066781/processo\_de\_produo\_do\_concreto.pdf).
- 30 KABIR, A.; HASAN, M. Artificial Neural Network for concrete mix design. 03 2013.

- 31 PARKER, L. E. Notes on Multilayer, Feedforward Neural Networks CS494/594: Machine Learning Fall 2007. Disponível em: <http://web.eecs.utk.edu/~leparker/Courses/CS594-fall07/handouts/Neural-net-notes.pdf>.
- 32 GARDNER, R. *Two-Way Tables*. 2009. Disponível em: <https://faculty.etsu.edu/gardnerr/1530/chapter6.pdf>.
- 33 NIELSEN, F. *Analysis of Two Analysis of Two -Way Tables*: Inference for two-way tables. 2009. Disponível em: <http://www.unc.edu/~nielsen/soci708/mod9/soci708mod9.pdf>.
- 34 VIALI, L. *Padronização*. 2017. Disponível em: [http://www.pucrs.br/ciencias/viali/publicacoes/outras/contro\\\_20.htm](http://www.pucrs.br/ciencias/viali/publicacoes/outras/contro\_20.htm).
- 35 BENVENUTO, N.; PIAZZA, F. The backpropagation algorithm. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1992. ISSN 1053587X.
- 36 KAPUR, R. *Neural Networks and The Backpropagation Algorithm, Explained*. 2016. Disponível em: <https://ayearofai.com/rohan-lenny-1-neural-networks-the-backpropagation-algorithm-explained-abf4609d4f9d>.

## ANEXO A – REFERÊNCIAS NORMATIVAS

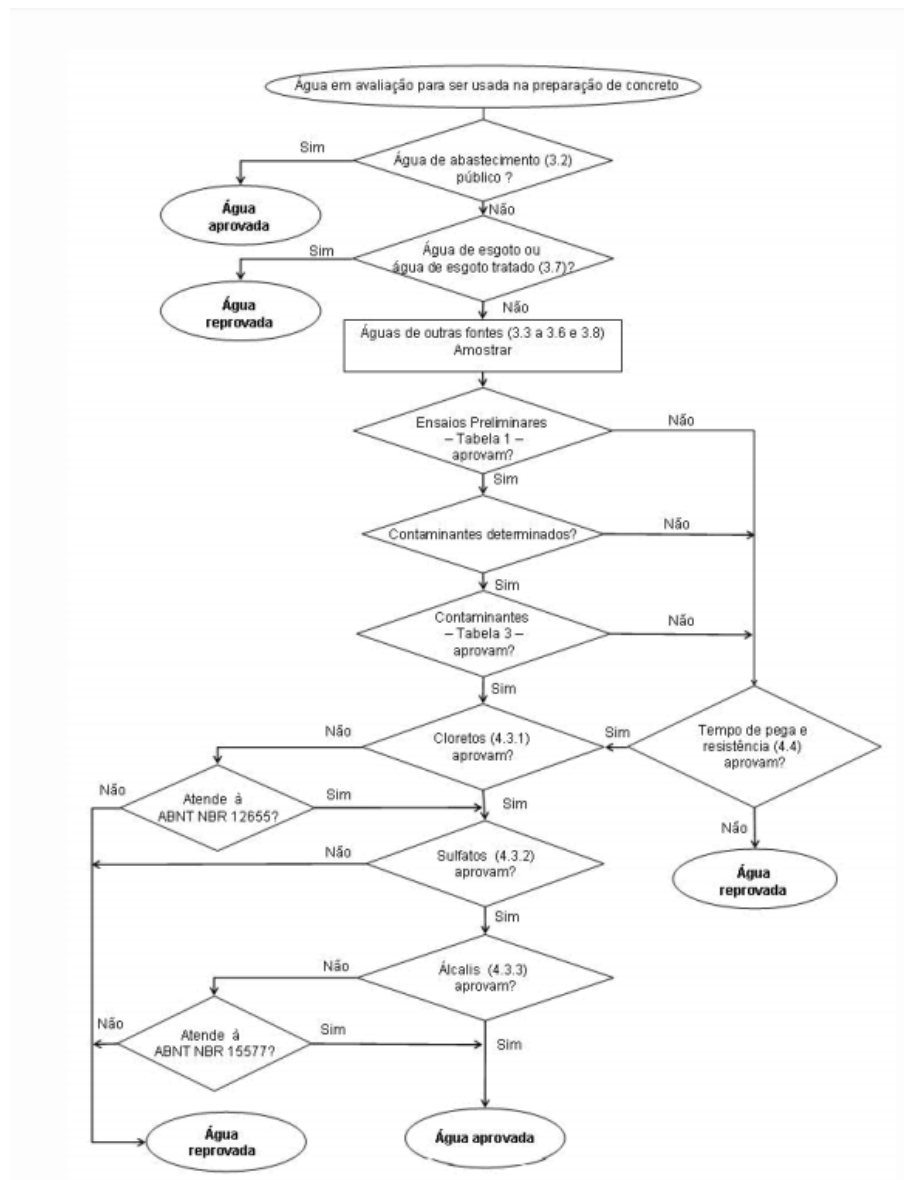


Figura 35: Fluxograma de aceitação da água para amassamento do concreto. Fonte: ABNT 15900:2009

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland Pozolânico	CP IV	25, 32 ou 40	RS ou BC	45-85	0	15-50	0-10

Tabela 12: Limites de composição do cimento Portland CP IV (porcentagem em massa)  
Fonte: [13]

Sigla	Classe	Finura	Tempo de início de pega (min)	Expansibilidade a quente (mm)	Resistência				Índice de brancura
		Resíduo na peneira 75 µm (%)			1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
CP IV	25	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8	≥ 15	≥ 25	-
	32	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32	-
	40	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 12	≥ 23	≥ 40	-

Tabela 13: Requisitos físicos e mecânicos do cimento CP IV. Fonte: [13]

Sigla	Classe	Enxofre na forma de sulfeto (%)	Tempo de fim de pega (min)	Expansibilidade a frio (mm)	Resistência à compressão aos 91 dias (Mpa)	Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> ) %
CP IV	25	-	≤ 720	≤ 5	≥ 32	≤ 5,5
	32				≥ 40	
	40				≥ 48	

Tabela 14: Determinações facultativas do cimento CP IV. Fonte: [13]

Tipo de cimento	Classe de resistência	Resistência à compressão (Mpa)		
		Limite inferior aos 7 dias	Limite inferior aos 28 dias	Limite superior aos 28 dias
CP IV	25	-	25	42
	32	-	32	49
	40	-	40	-

Tabela 15: Critérios de conformidade do cimento para classe de resistência. Fonte: [13]

Peneiras com aberturas de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites inferiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTA 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.  
NOTA 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.  
NOTA 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Tabela 16: Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo. Fonte: [14]

Peneiras com aberturas de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D <sup>a</sup>				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 - 5
63 mm	-	-	-	-	5 - 30
50 mm	-	-	-	0 - 5	75 - 100
37,5 mm	-	-	-	5 - 30	90 - 100
31,5 mm	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25 mm	-	0 - 5	5 - 25 <sup>b</sup>	87 - 100	-
19 mm	-	2 - 15 <sup>b</sup>	65 <sup>b</sup> - 95	95 - 100	-
12,5 mm	0 - 5	40 - 65 <sup>b</sup>	92 - 100	-	-
9,5 mm	2 - 15 <sup>b</sup>	80 <sup>b</sup> - 100	95 - 100	-	-
6,3 mm	40 - 65 <sup>b</sup>	92 - 100	-	-	-
4,75 mm	80 <sup>b</sup> - 100	95 - 100	-	-	-
2,36 mm	95 - 100	-	-	-	-

<sup>a</sup> Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.  
<sup>b</sup> Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Tabela 17: Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo. Fonte: [14]

Determinação	Método de ensaio		Quantidade máxima relativa à massa do agregado miúdo (%)
Torrões de argila e materiais friáveis	ABNT NBR 7218		3,0
Materiais carbonosos <sup>a</sup>	ASTM C 123	Concreto aparente	0,5
		Concreto não aparente	1,0
Material fino que passa através da peneira de 75 µm por lavagem (material pulverulento)	ABNT NBR NM 46	Concreto submetido a desgaste superficial	3,0
		Concretos protegidos do desgaste superficial	5,0
Impurezas orgânicas <sup>b</sup>	ABNT NBR NM 49		A solução obtida no ensaio deve ser mais clara do que a solução padrão
	ABNT NBR 7221	Diferença máxima aceitável entre os resultados de resistência à compressão comparativos	10%

<sup>a</sup> Quando não for detectada a presença de materiais carbonosos durante a apreciação petrográfica, pode-se prescindir do ensaio de qualificação dos materiais carbonosos (ASTM C 123).

<sup>b</sup> Quando a coloração da solução obtida no ensaio for mais escura do que a solução-padrão, a utilização do agregado miúdo deve ser estabelecida pelo ensaio previsto na ABNT NBR 7221.

Tabela 18: Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado miúdo com relação à massa do material. Fonte: [14]

Determinação	Método de ensaio		Quantidade máxima relativa à massa do agregado graúdo (%)
Torrões de argila e materiais friáveis	ABNT NBR 7218	Concreto aparente	1,0
		Concreto sujeito a desgaste superficial	2,0
		Outros concretos	3,0
Materiais carbonosos <sup>a</sup>	ASTM C 123	Concreto aparente	0,5
		Concreto não aparente	1,0
Material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem (material pulverulento) <sup>b c</sup>	ABNT NBR NM 46		1,0

<sup>a</sup> Quando não for detectada a presença de materiais carbonosos durante a apresentação petrográfica, pode prescindir do ensaio de qualificação dos materiais carbonosos (ASTM C 123)

<sup>b</sup> Para agregados produzidos a partir de rochas com absorção de água inferior a 1%, determinados conforme a ABNT NBR NM 53, o limite do material fino pode ser alterado de 1% para 2%.

<sup>c</sup> Para agregado total, definido conforme 3.6, o limite de material fino pode ser composto até 6,5%, desde que seja possível comprovar, por apreciação petrográfica, realizada de acordo com a ABNT NBR 7389, que os grãos constituintes acima de 150 µm não indicam a presença de finos que interferem nas propriedades do concreto. São exemplos de materiais prejudiciais os materiais micáceos, ferruginosos e argilominerais expansivos.

Tabela 19: Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado graúdo com relação à massa do material. Fonte: [14]

Propriedade	Método de ensaio	Requisito
Homogeneidade <sup>a</sup>	Exame visual	Homogêneo no momento de sua utilização. A presença de materiais insolúveis não pode ultrapassar os limites fixados pelo fabricante em sua especificação
Cor <sup>a</sup>	Exame visual	Uniforme e similar à descrição informada pelo fabricante
Massa específica <sup>a</sup> (d) (somente para líquidos)	ABNT NBR 10908	Se $d > 1,10$ , a tolerância é $\pm 0,03 \text{ g/cm}^3$ Se $d \leq 1,10$ , a tolerância é $\pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ Onde $d$ corresponde ao valor de massa específica fixado pelo fabricante
Teor de resíduos sólidos <sup>a</sup> ( $r$ )	ABNT NBR 10908	Se $r \geq 20\%$ , a tolerância é de $\pm 5\%$ de $r$ Se $r < 20\%$ , a tolerância é de $\pm 10\%$ de $r$ Onde $r$ corresponde ao valor de resíduos sólidos fixado pelo fabricante, em porcentagem de massa
pH <sup>a</sup>	ABNT NBR 10908	Valor fixado pelo fabricante com tolerância de $\pm 1$
Cloretos solúveis em água ( $\text{Cl}^-$ ) <sup>a</sup>	ABNT NBR 10908	$\leq 0,15\%$ , em massa <sup>b</sup> , ou não maior que o valor fixado pelo fabricante no caso de aditivos para uso em concreto simples (não armado)
<sup>a</sup> O valor declarado pelo fabricante deve ser informado por escrito. <sup>b</sup> Teor de cloretos menor ou igual a 0,15%, em massa, corresponde a aditivo isento de íons cloretos.		

Tabela 20: Requisitos gerais dos aditivos. Fonte: [15]

## ANEXO B – VARIÁVEIS ANALISADAS

Variável	Significado
Diâmetro (mm)	Diâmetro máximo das britas
Classe (controle interno da obra)	Classe de resistência do concreto
Tipo	Dividem os concretos em três grupos: convencional, bombeável ou compactado a rolo
Temperatura ambiente	Temperatura ambiente na moldagem
Temperatura da amostra	Temperatura da amostra na moldagem
Hora da moldagem	Horário de moldagem dos corpos de prova
Altura da amostra	Altura do corpo de prova
Diâmetro da amostra	Diâmetro do corpo de prova
Resistência (MPa)	Resistências em 3, 7, 28 e 90 dias
Fck (MPa)	Resistência característica do concreto
Idade de controle (dias)	Idade de controle dos corpos de prova
Consistência (cm)	Consistência do corpo de prova
Ar incorporado (%)	Quantidade de ar incorporado ao concreto
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	Relação entre massa e volume não compactado
Cimento equivalente (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica do cimento x Volume de aglomerante
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Massa por volume de concreto
Água (kg/m <sup>3</sup> )	Massa por volume de concreto
Sílica Ativa (kg/m <sup>3</sup> )	Massa por volume de concreto
Areia natural (kg/m <sup>3</sup> )	Massa por volume de concreto
Areia siltosa (kg/m <sup>3</sup> )	Massa por volume de concreto
Areia artificial (kg/m <sup>3</sup> )	Massa por volume de concreto
Brita 12,5 mm (kg/m <sup>3</sup> )	Massa por volume de concreto
Brita 25,0 mm (kg/m <sup>3</sup> )	Massa por volume de concreto

Brita 50,0 mm (kg/m <sup>3</sup> )	Massa por volume de concreto
Marca aditivo (kg/m <sup>3</sup> )	Marca do aditivo utilizado
Aditivo Polifuncional (kg/m <sup>3</sup> )	Massa por volume de concreto
Aditivo Incorporador de Ar (kg/m <sup>3</sup> )	Massa por volume de concreto
Aditivo Acelerador de Pega (kg/m <sup>3</sup> )	Massa por volume de concreto
Aditivo Plastificante em Pó (kg/m <sup>3</sup> )	Massa por volume de concreto
Aditivo Hiper Plastificante (kg/m <sup>3</sup> )	Massa por volume de concreto

Tabela 21: Dados sobre os concretos da margem esquerda da obra da UHE Santo Antônio (Porto Velho - RO). Fonte: Planilhas de Excel fornecida pela Eletrobras Furnas.