

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO CONCRETO USINADO
PRODUZIDO NO DISTRITO FEDERAL**

**JORDANNA SABOIA VERAS
VÍTOR MENDONÇA SILVA NUNES**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF

MAIO - 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO CONCRETO USINADO
PRODUZIDO NO DISTRITO FEDERAL**

**JORDANNA SABOIA VERAS
VÍTOR MENDONÇA SILVA NUNES**

ORIENTADORA: VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM SISTEMAS CONSTRUTIVOS E
MATERIAIS

BRASÍLIA / DF

MAIO/2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO CONCRETO USINADO PRODUZIDO
NO DISTRITO FEDERAL**

**JORDANNA SABOIA VERAS
VÍTOR MENDONÇA SILVA NUNES**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

PROF.^a VALDIRENE MARIA S. CAPUZZO, DSc. (UnB)
(ORIENTADORA)

PROF. RODRIGO DE MELO LAMEIRAS, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

RENATO SALLES CORTOPASSI
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 09 DE MAIO DE 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

VERAS, JORDANNA SABOIA; NUNES, VÍTOR MENDONÇA SILVA

Avaliação da qualidade do concreto usinado produzido no Distrito Federal [Distrito Federal] 2022.

xvii, 90p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, engenharia Civil, 2022).

Monografia de Projeto Final 2 – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Qualidade do concreto

2. Controle Tecnológico

3. Análises Estatísticas

4. Consistência

5. Resistência à compressão

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VERAS, J.S. (2022) e NUNES, V.M.S. (2022). Avaliação da qualidade do concreto usinado produzido no Distrito Federal. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Jordanna Saboia Veras e Vítor Mendonça Silva Nunes

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação da qualidade do concreto usinado produzido no Distrito Federal

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2022

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito dos autores.



Jordanna Saboia Veras

jordannasaboia@gmail.com



Vítor Mendonça Silva Nunes

vitormendes.09@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Sindicato da Indústria da Construção Civil do Distrito Federal (Sinduscon-DF) e em especial à Gezeli Bandeira de Mello pelo auxílio prestado desde o princípio desta pesquisa, contextualizando-nos sobre o cenário da construção civil na região e permitindo o contato com diversas construtoras. Ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI-DF) nossa gratidão pela transparência na divulgação de dados e informações e pelas visitas aos seus laboratórios. Agradecemos a ambas as instituições pela contribuição e fomento ao crescimento e desenvolvimento da construção civil na capital federal.

Agradecemos também a todas as três construtoras que divulgaram seus resultados para essa pesquisa, que nos receberam com atenção e profissionalismo e que acreditam em um mercado de engenharia cada vez mais maduro por meio da análise de dados transparentes e confiáveis. À Universidade de Brasília (UnB) e à Faculdade de Tecnologia nossa gratidão pelos cinco anos e meio de graduação, nos apoiando e proporcionando um ambiente rico de crescimento profissional e pessoal.

Consagro minha graduação, essa pesquisa e minha vida profissional e pessoal ao meu Senhor, a Ele seja dada toda honra e glória. Aos meus pais, Maurício Mendonça Nunes e Gisele Ribeiro da Silva e à minha irmã Lígia Ribeiro Silva Nunes meu agradecimento por tudo o que sempre fizeram por mim: pelo investimento em minha educação desde a infância, por serem minha inspiração, por me ajudarem nos momentos mais difíceis, mas principalmente por terem me conduzido no caminho de Deus desde o princípio, amo vocês.

Agradeço a Deus por ter me dado forças e me guiado nessa jornada, espero honrá-lo e exaltá-lo ao longo de toda a minha vida. Aos meus pais, José Ribamar Veras de Souza e Socorro Cláudia Saboia Veras e à minha irmã Geovanna Saboia Veras por todo o incentivo dado para que eu persistisse nos meus estudos e nos meus sonhos, por compreenderem e me auxiliarem em todas os momentos turbulentos. Nunca conseguirei expressar toda a minha gratidão e amor por vocês.

Por fim, agradecemos à nossa professora e orientadora Valdirene Maria Silva Capuzzo por todo o auxílio prestado ao longo dessa pesquisa, ensinando, cobrando e direcionando nossas ações sempre com extrema atenção e educação. Nossa gratidão por ter aberto a oportunidade de fazermos essa dupla e por ter aceitado entrar nesta linha de pesquisa que tanto nos fez crescer contigo ao longo de nossos encontros de quinta. Desejamos todo o sucesso a você.

RESUMO

Visando otimizar o espaço no canteiro de obras, o concreto usinado vem ganhando grande espaço nas obras brasileiras. Entretanto, por meio do Projeto Indicadores do Concreto pertencente ao Sinduscon-DF, verificou-se que diversos concretos usinados não atendiam às especificações solicitadas, o que expõe a necessidade de revisão de projetos estruturais e em alguns casos a necessidade de realização de reforço nas estruturas. Com o objetivo de se avaliar tal inconformidade, foi realizada a avaliação da qualidade do concreto usinado produzido no Distrito Federal. Durante o estudo foi elaborado um banco de dados com 1.106 resultados relativos à consistência e a resistência à compressão, para consistências das classes S100, S160 e S220 e classe de resistências C30 e C40 do concreto usinado produzido em Brasília. Todos os ensaios de resistência foram realizados pelo corpo técnico do SENAI, e englobam ensaios realizados para idades diversas, fornecendo um panorama do desenvolvimento de resistência do concreto. Os resultados foram utilizados para calcular a média e o desvio-padrão para os concretos em geral do Distrito Federal e para cada concreteira. Também foi realizada a análise de *outliers* estatísticos e de distribuição normal das resistências. Dessa forma, a pesquisa foi capaz de apresentar um panorama da qualidade do concreto usinado produzido no Distrito Federal, de modo a produzir um retorno para a sociedade e para o setor da construção civil.

Palavras-chave: Qualidade do Concreto, Controle Tecnológico, Análises Estatísticas, Consistência, Resistência à compressão.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. OBJETIVO GERAL.....	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. ESTUDO DE DOSAGEM	17
3.2. PRODUÇÃO DE CONCRETO	23
3.2.1. Mistura.....	23
3.2.2. Transporte.....	23
3.2.3. Lançamento e adensamento.....	23
3.2.4. Acabamento.....	26
3.2.5. Cura	26
3.3. CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO	28
3.3.1. Propriedades no Estado Fresco.....	28
3.3.2. Propriedades no Estado Endurecido.....	29
3.3.3. Recomendações para não conformidade do controle tecnológico do concreto.....	33
3.4. CÁLCULO DO DESVIO-PADRÃO	36
3.5. DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....	37
3.6. CAUSAS DE DESCONFORMIDADE NO CONCRETO	38
3.6.1. Características do cimento.....	39
3.6.2. Características dos agregados.....	40
3.6.3. Método de transporte.....	40
3.6.4. Condições de realização do ensaio	41

4. METODOLOGIA	42
4.1. PARCERIA UNB, SINDUSCON-DF E SENAI	42
4.2. VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO	43
4.2.1. Ensaio de consistência.....	44
4.2.2. Moldagem e armazenamento dos corpos de prova	44
4.2.3. Ensaio de resistência à compressão.....	47
4.3. BANCO DE DADOS	48
4.4. ANÁLISES ESTATÍSTICAS	49
4.4.1. Outliers, Média e Mediana	49
4.4.2. Desvio Padrão.....	50
4.4.3. Distribuição Normal das resistências	52
4.5. CONTROLE E ACEITAÇÃO DO CONCRETO.....	52
4.6. POSSÍVEIS CAUSAS DE INCONFORMIDADE.....	53
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	56
5.1. VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO	56
5.1.1. Ensaio de consistência.....	56
5.1.2. Moldagem e armazenamento dos Corpos de Prova	57
5.1.3. Ensaio de resistência à compressão.....	60
5.2. BANCO DE DADOS	62
5.3. ANÁLISES ESTATÍSTICAS	66
5.3.1. Outliers, Média e Mediana	66
5.3.2. Desvio Padrão.....	74
5.3.3. Distribuição Normal das resistências	77
5.4. CONTROLE E ACEITAÇÃO DO CONCRETO.....	80

5.4.1. Resistência à compressão	80
5.4.2. Consistência.....	82
5.4.3. Casos de inconformidade	83
5.5. POSSÍVEIS CAUSAS DE INCONFORMIDADE.....	83
6. CONCLUSÃO.....	85
6.1. CONCLUSÕES	85
6.2. TRABALHOS FUTUROS	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Etapas do estudo de dosagem.....	22
Figura 3.2 - Concretagem de peças altas	25
Figura 3.3 - Adensamento utilizando vibradores por imersão.....	26
Figura 3.4 – Variação da Umidade Relativa no Distrito Federal.	27
Figura 3.5 – Fluxograma resumo do controle tecnológico	33
Figura 4.1 – Fluxograma com as atividades que foram desenvolvidas na pesquisa	43
Figura 4.2 – Fluxo de responsabilidades de possíveis causas de inconformidade no concreto.....	54
Figura 5.1 – Realização do ensaio de consistência. Canteiro 01 (a) e canteiro 03 (b).	56
Figura 5.2 – Resultado dos ensaios de consistência	57
Figura 5.3 – Moldagem dos corpos de prova. Canteiro 01 (a), canteiro 02 (b) e canteiro 03 (c).....	58
Figura 5.4 - Armazenamento. Canteiro 01 (a), canteiro 02 (b) e canteiro 03 (c).	60
Figura 5.5 – Número de ensaios por empresa por mês.....	63
Figura 5.6 – Identificação de <i>outliers</i> para concretos C30, idade de 28 dias	66
Figura 5.7 – Identificação de <i>outliers</i> para concretos C30, idade de 28 dias Concreteira A	67
Figura 5.8 – Identificação de <i>outliers</i> para concretos C30, idade de 28 dias Concreteira B	67
Figura 5.9 – Identificação de <i>outliers</i> para concretos C30, idade de 28 dias Concreteira C	68
Figura 5.10 – Identificação de <i>outlier</i> para concretos C30, todas as idades.	69
Figura 5.11 - Identificação de <i>outlier</i> para C30, todas as idades - Concreteira A.....	70
Figura 5.12 - Identificação de <i>outlier</i> para C30, todas as idades - Concreteira B.....	70
Figura 5.13 - Identificação de <i>outlier</i> para C30, todas as idades - Concreteira C.....	70
Figura 5.14 – <i>Outlier</i> para concreto C30, consistência S160, idade de 28 dias.	71
Figura 5.15 – <i>Outlier</i> para concreto C30, consistência S220, idade de 28 dias.	71

Figura 5.16 – Identificação de <i>outlier</i> para concretos C40, idade de 28 dias.....	72
Figura 5.17 - Identificação de <i>outlier</i> para C40, todas as idades.....	72
Figura 5.18 – Curva de Gauss para concreto C30	78
Figura 5.19 - Curva de Gauss para concreto C40.....	79
Figura 5.20 – Porcentagem de aprovação por concreteira.....	81
Figura 5.21 – Porcentagem de aprovação por concreteira.....	82
Figura 5.22 – Número de caminhões aprovados no indicador de consistência por concreteira.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação de concretos estruturais por classe de resistência.	17
Tabela 3.2 - Valores de desvio-padrão	18
Tabela 3.3 – Classes de agressividade ambiental	20
Tabela 3.4 - Classe de agressividade e qualidade do concreto	20
Tabela 3.5 - Classes de consistência.....	21
Tabela 3.6 – Valores máximos para formação de lotes de concreto	29
Tabela 3.7 – Rastreabilidade e formação de lotes segundo a amostragem adotada	30
Tabela 3.8 – Valores de Ψ_6	31
Tabela 3.9 – Níveis de controle com base no desvio-padrão	37
Tabela 3.10 – Probabilidade de ocorrência do valor padrão Z.....	38
Tabela 3.11 – Requisitos físicos e mecânicos para o cimento Portland	39
Tabela 4.1 – Número de camadas para moldagem dos corpos de prova.....	45
Tabela 4.2 – Método de adensamento	46
Tabela 4.3 - Fator de correção h/d	47
Tabela 5.1 – Quantidade de dados.....	63
Tabela 5.2 - Quantidade de dados por elemento concretado.....	65
Tabela 5.3 – Dados por consistência solicitada.....	65
Tabela 5.4 – Comparação das médias obtidas com e sem <i>outliers</i>	73
Tabela 5.5 - Média e Mediana	74
Tabela 5.6 – Desvio Padrão entre concreteiras, classes de resistência e classes de consistência em diferentes idades	75
Tabela 5.7 – Desvio Padrão por classe de resistência	76

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

μ	Média de uma variável aleatória
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
CP	Corpo de Prova
dp	Desvio-padrão de uma população
$f_{c, \text{betonada}}$	resistência à compressão do exemplar que representa o concreto da betonada
$f_{ci, \text{ext}}$	resistência de ruptura à compressão axial
$f_{ck, \text{est}}$	resistência característica à compressão estimada do concreto
f_{ckj}	resistência característica do concreto à compressão, na idade de j dias
f_{cm}	resistência à compressão média dos exemplares do lote
f_{cmj}	resistência média do concreto à compressão, na idade de j dias
f_m	resistência à compressão de cada exemplar de concreto
IST	Instituto SENAI de Tecnologia da Construção Civil
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
pi	Probabilidade de uma variável aleatória assumir o valor i
sd	Desvio-padrão
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
Sinduscon-DF	Sindicato da Indústria da Construção Civil do Distrito Federal
$\text{var}_{, \text{obs}}$	Variância Observada
$\bar{x}_{, \text{obs}}$	Média da população observada
x_i	Elemento de uma população

1. INTRODUÇÃO

O crescente dinamismo e avanços tecnológicos no setor da construção civil brasileira implicaram na maior participação do concreto usinado no país. Além de empregar um maior dinamismo a obra, o uso desse concreto também auxilia no enfretamento de gargalos da indústria, tais como: escassez de mão de obra especializada e a falta de espaço para armazenamento de materiais no canteiro (ISAIA, 2011). Na contratação do concreto usinado, a concreteira é responsável por entregar o concreto com as características especificadas em contrato, como resistências características, módulo de elasticidade e diâmetro máximo do agregado, enquanto a empresa responsável pela construção deve realizar o controle tecnológico do material em obra.

O controle tecnológico é caracterizado pela verificação em campo de, ao menos, duas propriedades fundamentais do material, sendo elas a consistência e a resistência à compressão, conforme especificado na NBR 12655 (ABNT, 2022). A primeira delas, no estado fresco, é a trabalhabilidade, medida de forma indireta por meio dos ensaios de abatimento do tronco de cone, sendo este um ensaio de recebimento sob responsabilidade do executor e regido pela NBR 16889 (ABNT, 2020a). O segundo indicador a ser verificado, já em estado endurecido, é a resistência à compressão do concreto usinado, realizando o ensaio de resistência segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018a).

Essas duas propriedades são fundamentais e complementares quando se trata de controle tecnológico. Uma vez que as propriedades do concreto no estado endurecido são diretamente afetadas pelo adensamento aplicado. Esse, por sua vez, depende que a consistência do concreto no estado fresco esteja compatível com as condições de transporte, lançamento, adensamento e acabamento específicas da obra (NEVILLE, 2016).

Do ponto de vista estatístico, o controle pode ser feito por amostragem parcial ou total, conforme especifica a NBR 12655 (ABNT, 2022). No primeiro caso, não se tem a identificação exata da peça estrutural que recebeu o concreto analisado e apenas algumas betonadas são testadas para resistência à compressão. Já no segundo caso, todas as betonadas possuem corpo de prova para a comprovação da sua resistência, sendo esse método mais utilizado por promover uma maior rastreabilidade do material.

Os resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão são importantes para as construtoras e concreteiras. Para a primeira, a aceitação do concreto está completamente condicionada pelo atendimento igual ou superior à resistência característica de projeto. Já

para a segunda, os resultados podem ser submetidos a análises estatísticas, onde é possível analisar o controle de qualidade, verificando seu desempenho produtivo, indicado principalmente pelo desvio-padrão (ISAIA, 2011).

Devido a complexidade e importância do concreto usinado no Distrito Federal, torna-se necessária a realização de um estudo para se avaliar a qualidade do material produzido na região, empregando uma análise quantitativa para uma aferição mais assertiva a respeito da sua qualidade. Utilizando, para isso, análises estatísticas de indicadores de controle tecnológico como consistência e resistência à compressão, o que pode contribuir com as construtoras para maior aceitação do material, com as concreteiras para melhorias no processo produtivo e com o mercado da construção civil de forma geral.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Essa pesquisa tem como objetivo geral calcular indicadores estatísticos de dispersão referentes à resistência à compressão do concreto usinado produzido no Distrito Federal. Com a posse desses dados, tem-se como objetivo aprimorar o cálculo da resistência de dosagem do concreto fornecido pelas concreteiras.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a análise estatística em amostras de concretos usinados, de mesma classe de resistência, produzidos em obras no Distrito Federal.
- Realizar a análise estatística em amostras de concretos usinados, de mesma classe de consistência, produzidos em obras no Distrito Federal.
- Identificar as empresas que necessitem melhorias no processo produtivo do concreto, sendo melhorias para o aumento da aceitação do material e/ou para a melhoria do domínio das variáveis que impactem no concreto fornecido.
- Avaliar a qualidade geral do concreto usinado produzido no Distrito Federal, indicando possíveis causas de inconformidade.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. ESTUDO DE DOSAGEM

Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2022), o estudo de dosagem compreende os procedimentos necessários para a obtenção do traço de concreto que atenda a todos os requisitos estruturais e as condições de obra. Em geral, os requisitos estruturais expressam as características necessárias ao concreto em seu estado endurecido, enquanto as condições de obra expressam as propriedades do concreto no estado fresco, tais como: transporte, condições de lançamento, adensamento e acabamento. A dosagem é a etapa responsável por atender todas as exigências, selecionando os componentes e suas proporções, de forma a tornar o concreto o mais econômico possível (HELENE; TERZIAN, 1993; NEVILLE, 2016).

Por instrução da NBR 12655 (ABNT, 2022), deve ser aplicado um processo de dosagem racional e experimental em todo concreto com classe igual ou superior a C20, ou seja, com resistência característica à compressão igual ou acima de 20 MPa, conforme apresentado na Tabela 3.1. O estudo de dosagem deve simular as condições da obra, além de utilizar os mesmos materiais do canteiro, como: tipo, classe e marca do cimento, agregados, aditivos, entre outros materiais empregados. A cada vez que ocorrer alteração nos materiais utilizados, deve-se realizar um novo estudo de dosagem.

Tabela 3.1 - Classificação de concretos estruturais por classe de resistência.

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão (MPa)	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão (MPa)
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Fonte: ABNT NBR 8953 (2015)

Dentre os requisitos mais usuais a serem atendidos nessa etapa se destacam: resistência característica à compressão, trabalhabilidade e durabilidade. A resistência característica de projeto, juntamente com o desvio-padrão, influencia na resistência de dosagem. Essa deve garantir que o concreto determinado em laboratório possua os requisitos estabelecidos em projeto, mesmo que ocorram variações durante a produção.

As variações são consideradas no cálculo da resistência de dosagem por meio do desvio-padrão (s_d), podendo esse parâmetro ser conhecido ou não. Para a adoção de um desvio conhecido é necessário que a dosagem seja realizada com os mesmos materiais, com equipamentos similares e condições equivalentes ao canteiro, além de obter, ao menos, 20 resultados consecutivos em um período de 30 dias, em nenhum caso o valor adotado para o desvio-padrão de dosagem pode ser menor do que 2 MPa, de acordo com os normativos da NBR 12655 (ABNT, 2022).

Nos casos em que o desvio padrão não é conhecido, adota-se os valores tabelados pela NBR 12655 (ABNT, 2022), que levam em consideração as condições de preparo do concreto no canteiro, sendo elas:

- Condição A: Quando ocorre a correção de água em função da umidade dos agregados e quando cimento e agregados são medidos em massa, a água é medida em massa ou por volume, quando utilizado dosador;
- Condição B: Aplicável apenas para classes C10 a C20. Ocorre quando o cimento é medido em massa, a água é medida em volume, utilizando dosador, e os agregados são medidos em massa combinada com volume;
- Condição C: Válida apenas para concretos C10 a C15, não estruturais. O cimento é medido em massa, os agregados em volume e a água é medida em volume. A quantidade de água deve ser corrigida em função da estimativa de umidade dos agregados da determinação da consistência do concreto.

Dessa forma, conhecida a condição de preparo durante a construção, adota-se o valor do desvio-padrão de acordo com a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Valores de desvio-padrão

Condição de preparo do concreto	Desvio-padrão (MPa)
A	4,0
B	5,5
C	7,0

Fonte: ABNT NBR 12655 (2022)

Conhecido o desvio-padrão, pode-se calcular resistência de dosagem utilizando a Equação 3.1.

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 * s_d$$

Equação 3.1

Sendo,

- f_{cmj} é a resistência média do concreto à compressão, na idade de j dias, dada em MPa.
- f_{ckj} é a resistência característica do concreto à compressão, aos j dias, dada em MPa.
- s_d é o desvio-padrão.

Atendidos os requisitos de resistências, deve-se atentar para as condições de durabilidade. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014a), essa propriedade pode ser definida como sendo a capacidade da estrutura em resistir às intempéries ambientais as quais está submetida. Para que esse fator seja levado em consideração nos projetos, a NBR 6118 (ABNT, 2014a) apresenta classes de agressividade ambiental, relacionando-as com o risco de deterioração da estrutura, como pode ser visto na Tabela 3.3. Devido aos riscos existentes para cada classe, a NBR 12655 (ABNT, 2022) apresenta requisitos mínimos que devem ser adotados para se ter o atendimento às condições de durabilidade, expressos na Tabela 3.4, ainda que não se devam restringir inovações a serem comprovadas tecnicamente que estimulem um uso ainda menor de cimento Portland, por exemplo, a partir do uso de aditivos em diferentes proporções.

Tabela 3.3 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura.
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito Forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014)

Tabela 3.4 - Classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Classe de agressividade			
	I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
Classe de concreto (NBR 8953)	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto (kg/m ³)	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

Fonte: ABNT NBR 12655 (2022)

Além dos tipos de ambiente apresentados na Tabela 3.3, a NBR 12655 (ABNT, 2022) também apresenta condições especiais de exposição e os seus requisitos. As condições especiais são aplicadas para concretos que necessitam ter baixa permeabilidade, possuem exposição a processos de congelamento e descongelamento, ou expostos a cloretos ou sulfatos.

A trabalhabilidade é o fator mais utilizado para verificar se as condições de obra estão sendo atendidas. Esse fator engloba a necessidade de fluidez e de coesão no estado fresco para a aplicação do concreto no canteiro. A fluidez é afetada principalmente pela relação água/cimento ou pela adição de aditivos superplastificantes para uma mesma relação água/cimento. Ela é determinada de acordo com as características geométricas da estrutura, do método de transporte e dos processos de lançamento e de adensamento. A coesão é garantida pela escolha adequada da granulometria dos agregados, a falta dessa propriedade promove a segregação dos elementos constituintes do concreto, de forma que não se possa mais considerar o material como uniformemente distribuído (NEVILLE, 2016).

A trabalhabilidade atualmente é avaliada de forma indireta nos ensaios de consistência por meio do abatimento do tronco de cone, de acordo com os procedimentos descritos na NBR 16889 (ABNT, 2020a) e é fortemente relacionada com a técnica de execução a ser utilizada no canteiro, relacionada com a esbeltez do elemento, densidade de armadura da peça estrutural e o tipo de transporte, podendo esse ser convencional ou bombeado. O ensaio de consistência busca avaliar se o concreto recebido está dentro da classe especificada. Essas classes são definidas pela NBR 8953 (ABNT, 2015a), e mostradas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Classes de consistência

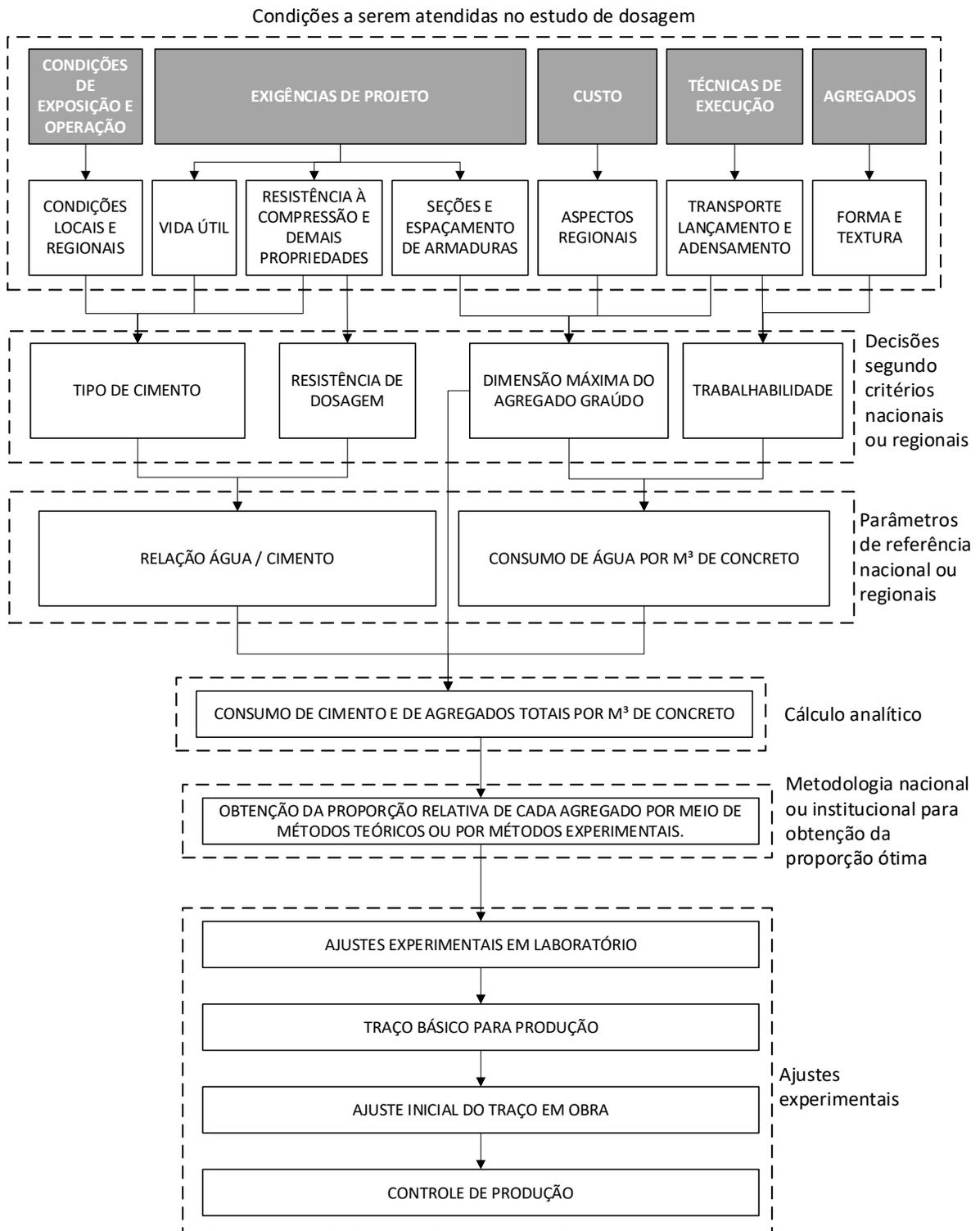
Classe	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e elementos de fundação
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	≥ 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: ABNT NBR 8953 (2015)

Segundo Helene e Terzian (1993), além das condições técnicas que devem ser observadas durante o estudo de dosagem, também é necessário que essa etapa leve em consideração os custos para a produção do concreto especificado, a disponibilidade dos agregados na região e a técnica de execução empregada. A escolha do agregado deve ser relacionada com aqueles disponíveis economicamente na região, uma vez que na localidade da obra pode não haver disponibilidade de texturas e formas ideais ou até mesmo possuir apenas agregados que apresentem reatividade com a pasta de cimento, dessa forma é necessário que seus efeitos sejam estudados durante a dosagem. De acordo com esses autores, o concreto é dito econômico quando consegue atender todas as exigências relatadas acima com o mínimo consumo de cimento, ou com o menor emprego de aditivos com custo similar ao cimento.

Definidos todos os critérios que devem ser atendidos, levando em consideração o custo e o transporte, a Figura 3.1 apresenta resumidamente todas as etapas abrangidas no estudo de dosagem.

Figura 3.1 – Etapas do estudo de dosagem



Fonte: Helene e Terzian (1993), adaptado

3.2. PRODUÇÃO DE CONCRETO

3.2.1. Mistura

A mistura é o processo em que todas as proporções de materiais obtidas no estudo de dosagem são submetidas a uma rotação ou agitação mecânica, de modo que a pasta de cimento envolva completamente a superfície dos agregados e se obtenha uma massa uniforme (NEVILLE; BROOKS, 2013). Esse processo pode ser realizado por betoneiras, em central misturadora, ou por caminhões-betoneira.

3.2.2. Transporte

O transporte do concreto pode ocorrer dentro do canteiro de obras utilizando jericas, carrinhos de mão, esteira, entre outros, ou pode ocorrer por meio de bombeamento. O método é selecionado de forma que se utilize o transporte mais econômico para a obra e o mais adequado para as proporções de materiais adotados no concreto, para a acessibilidade do local de concretagem e de acordo com as condições climáticas, mantendo a mistura coesa e livre de segregação (ACI, 2009; NEVILLE; BROOKS, 2013)

Segundo as recomendações da NBR 14931 (ABNT, 2004), o método de transporte escolhido deve ser adequado para que o intervalo de tempo entre o primeiro contato da água de amassamento com o cimento e o final da concretagem não seja superior a 2h30min. A norma estabelece que em condições em que o tempo de pega do concreto se dê de forma mais acelerada, deve-se diminuir o intervalo estipulado ou fazer uso de aditivos retardadores de pega, que mantenham a qualidade do concreto especificado.

3.2.3. Lançamento e adensamento

Segundo Neville e Brooks (2013) as operações de lançamento e adensamento são as que mais afetam as propriedades de resistência, impermeabilidade e durabilidade do concreto no estado endurecido. Dessa forma, a execução dessas etapas deve possuir maior controle e seguir as recomendações normativas. Para que a etapa de lançamento ocorra de forma adequada, deve-se atender aos cuidados preliminares prescritos pela NBR 14931 (ABNT, 2004):

- Nivelar completamente as formas, com prumo e dimensões conforme especificação de projeto, de modo que seja assegurada a geometria dos elementos estruturais. Internamente as formas devem ser limpas e estanques;

- Posicionar e fixar as escoras, de forma a assegurar as dimensões e posições das formas, além de permitir o tráfego seguro de pessoas e equipamentos durante a concretagem;
- As armaduras devem ter a montagem, posição e cobrimentos conforme indicado em projeto, garantida pela utilização adequada de espaçadores.

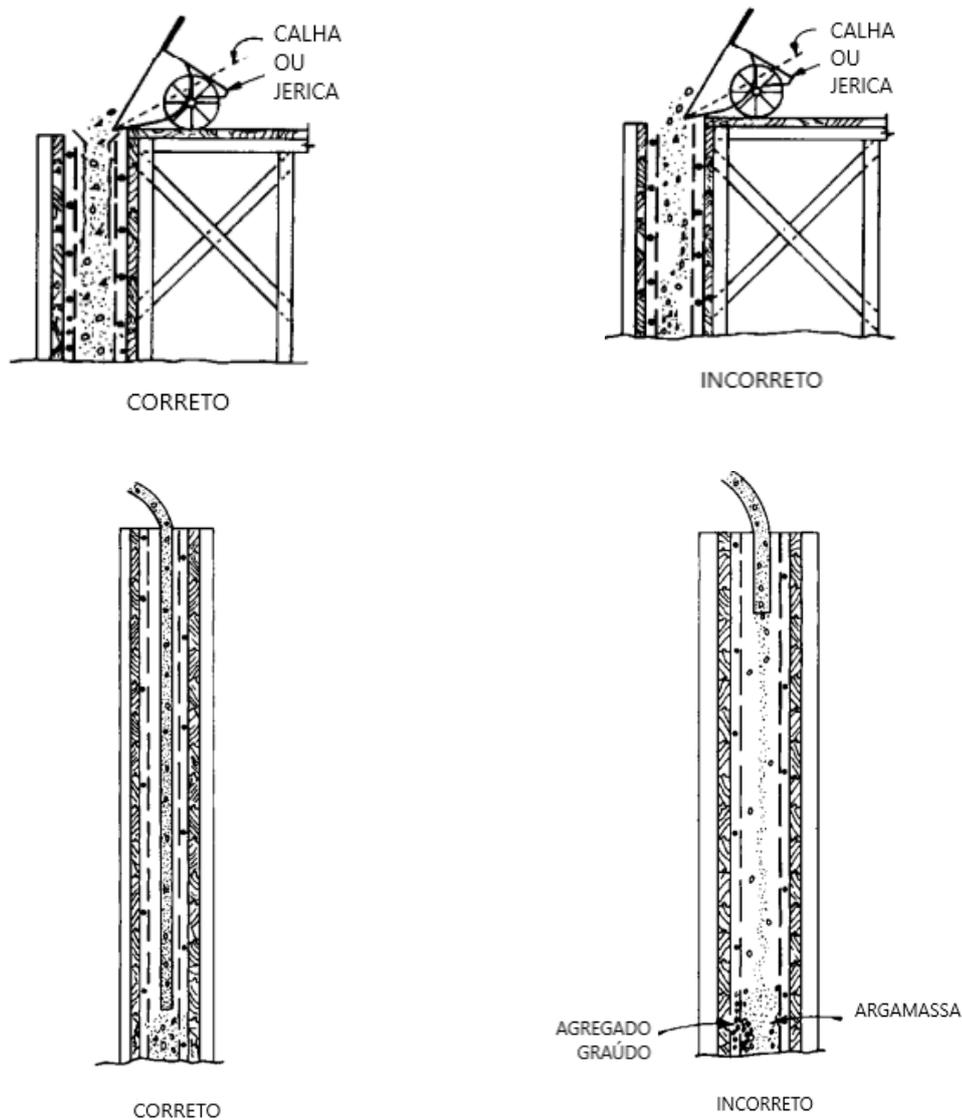
Realizadas as etapas iniciais de cuidado com as formas, escoras e armaduras, pode-se realizar o lançamento do concreto. Essa operação deve garantir que a armadura seja completamente envolta na massa de concreto e que o material se mantenha coeso. Para isso, a NBR 14931 (ABNT, 2004) e Neville e Brooks (2013) fazem as seguintes recomendações para o lançamento adequado do concreto na estrutura:

- O lançamento deve ocorrer próximo da posição definitiva;
- As formas devem ser preenchidas de maneira uniforme, evitando pontos de concentração que possam causar deformações em sua geometria;
- A técnica de lançamento deve impedir a segregação dos componentes, especialmente em casos em que a queda livre do concreto seja superior a 2 metros de altura ou quando houver uma alta densidade de armaduras;
- A espessura das camadas no lançamento deve ser inferior à altura do vibrador mecânico, para que seja possível obter o adensamento adequado da peça. A espessura da camada deve ser, obrigatoriamente, inferior a 50 cm;
- A velocidade de lançamento e adensamento devem ser iguais;
- Antes que ocorra o lançamento de uma nova camada, a anterior deve estar completamente adensada;
- No momento da aplicação da nova camada, a anterior deve estar ainda no estado plástico.

Seguindo todas as recomendações, o lançamento pode ser considerado adequado. Em relação a concretagem de peças altas, a NBR 14931 (ABNT, 2004) recomenda que seja adotada ao menos uma das seguintes práticas:

- Utilizar concreto com teor de argamassa e consistência adequados;
- Lançar primeiramente uma argamassa com composição igual à do concreto estrutural;
- Utilizar dispositivos que conduzam o concreto até o seu local de deposição, conforme mostra a Figura 3.2.

Figura 3.2 - Concretagem de peças altas



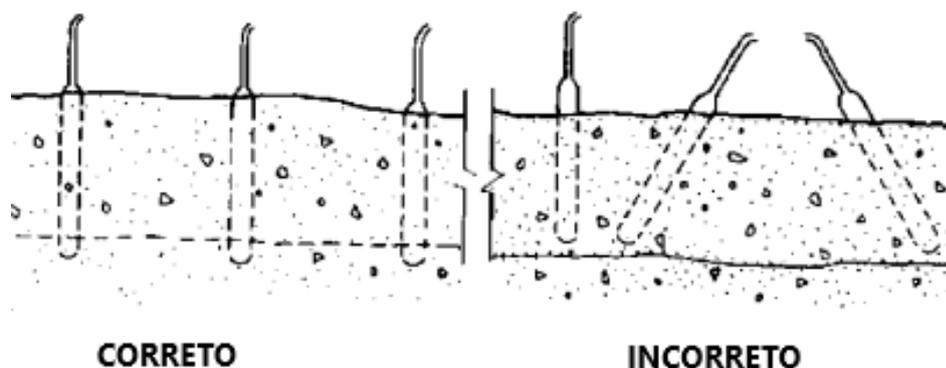
Fonte: ACI 304 R-00 (2009), adaptado

O adensamento ocorre de forma concomitante ao lançamento. Nessa etapa busca-se remover a maior quantidade de ar aprisionado no concreto, de forma que no estado endurecido, o material apresente a menor quantidade de vazios, tornando-o mais resistente e durável possível (NEVILLE; BROOKS, 2013). O adensamento pode ser realizado de maneira manual ou mecânica, sendo esse último o método mais empregado por meio do uso de vibradores de imersão.

Segundo a NBR 14931 (ABNT, 2004), para que a peça tenha adensamento adequado utilizando vibradores de imersão é necessário que as camadas possuam espessuras aproximadamente iguais a $\frac{3}{4}$ do comprimento da agulha e o vibrador deve penetrar,

aproximadamente, 10 cm na camada anterior, conforme mostra a Figura 3.3. O equipamento deve ser aplicado na vertical e ser retirado de maneira lenta quando a superfície se apresentar brilhante. A NBR 14931 (ABNT, 2004) ainda orienta que se deve evitar o contato do vibrador com as formas e com as armaduras, a fim de se evitar a formação de vazios na peça, o que possibilita o deslocamento da armadura podendo prejudicar o seu desempenho frente às solicitações normais durante o uso da edificação.

Figura 3.3 - Adensamento utilizando vibradores por imersão



Fonte: ACI 304 R-00 (2009), adaptado

3.2.4. Acabamento

Segundo a NBR 14931 (ABNT, 2004) o acabamento é a etapa final responsável por fornecer a aparência desejada para a superfície em relação a geometria, textura, cor, de modo que se obtenha uma superfície uniforme. Durante essa etapa deve-se evitar a manipulação excessiva do concreto, pois pode provocar a segregação e exsudação excessiva, interferindo na qualidade final da peça.

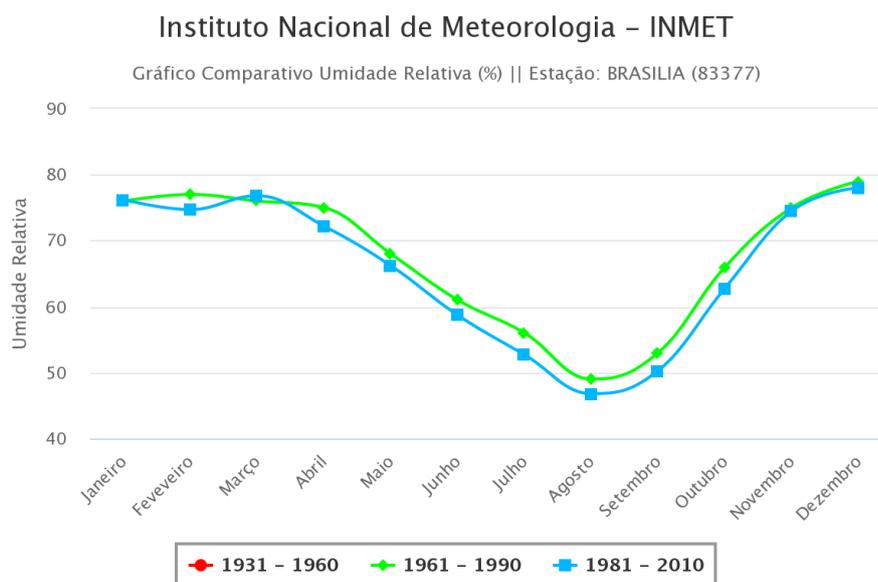
3.2.5. Cura

O processo de cura engloba todas as medidas adotadas para se evitar a evaporação precoce da água presente no concreto, conservando a umidade necessária para a formação dos produtos de hidratação a níveis desejados (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2020; NEVILLE; BROOKS, 2013). Para a NBR 14931 (ABNT, 2004) a cura deve ser realizada até que o concreto apresente uma resistência característica à compressão igual ou superior a 15 MPa.

A cura é uma etapa fundamental para a obtenção das características de durabilidade e resistência do concreto desejadas durante toda a vida útil da estrutura (NEVILLE; BROOKS, 2013). Isso ocorre, pois, a cura diminui a formação de fissuras nas idades iniciais do concreto. Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2020), o concreto, em suas idades iniciais, possui a tendência de sofrer retrações devido a evaporação de água da mistura. Dessa forma, a evaporação deve ser combatida por meio do fornecimento constante de água para a estrutura. Esse fornecimento pode ser realizado por meio da molhagem das superfícies aparentes do concreto ou por molhagem das faces das formas, além da possibilidade de utilização de outros métodos, como por exemplo cura a vapor, película de impermeabilização, dentre outros.

No Distrito Federal ocorre um forte período de estiagem entre junho e setembro, onde a umidade relativa média do ar é inferior a 55%, durante a maior parte do período, como mostra a Figura 3.4, podendo ser inferiores a 20% durante o dia. Essa condição climática, típica do cerrado, é um fator a ser considerado durante a execução da concretagem nessa região, pois se não forem tomadas medidas para alteração do microclima da região da obra, ocorre a evaporação da água do concreto antes mesmo que a concretagem tenha sido finalizada. Dessa forma, construtores locais recomendam que, quando a umidade relativa estiver abaixo de 20%, sejam realizadas medidas de alteração do microclima, até que a umidade atinja valores superiores a 50%, essa alteração pode ser alcançada por meio da contínua aspersão de água.

Figura 3.4 – Variação da Umidade Relativa no Distrito Federal.



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia.

3.3. CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO

O controle tecnológico do concreto consiste na avaliação de parâmetros do material em estado fresco e endurecido, que são medidos por meio de ensaios específicos orientados pelas respectivas normas. No estado fresco, deve-se realizar o ensaio de consistência descrito na NBR 16889 (ABNT, 2020) e no estado endurecido o ensaio de resistência à compressão deve seguir as orientações da NBR 5739 (ABNT, 2018a), as quais fornecerão embasamento para o recebimento e a aceitação do concreto.

Deve-se constatar ainda que o controle tecnológico do concreto no recebimento não leva em consideração as influências de parâmetros que envolvam o processo de concretagem em si, como transporte, cura, abatimento e outros. Assim, os ensaios mencionados anteriormente se referem a aspectos produtivos do concreto e não de parâmetros relativos ao uso do material em obra, ainda que eles interfiram na resistência final adquirida pela edificação.

3.3.1. Propriedades no Estado Fresco

Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2022), pode-se definir concreto fresco como aquele que está completamente misturado e que ainda se encontra em estado plástico, capaz de ser adensado por um método escolhido. Assim, a aceitação do concreto fresco tem como parâmetro de análise a consistência do material, medida por meio do ensaio do abatimento do tronco de cone.

O ensaio supracitado é orientado pela NBR 16889 (ABNT, 2020a) e consiste em uma medida do assentamento do material em laboratório ou em obra, sendo essa uma boa referência para a avaliação da trabalhabilidade do concreto. A trabalhabilidade em si, segundo Neville e Brooks (2013), pode ser definida como a quantidade de trabalho interno útil necessário para obtenção do adensamento total, estando o esforço necessário para lançar o concreto relacionando com: as propriedades reológicas da pasta de cimento, o atrito interno entre as partículas do agregado e o atrito externo entre o concreto e a superfície da forma.

O valor obtido no ensaio do abatimento do tronco de cone pode variar de acordo com as especificidades que se tem para o material em análise. Assim, de acordo com o elemento que receberá o concreto, como a estrutura propriamente dita, elementos de fundação e outros, têm-se uma classe de consistência distinta para um melhor aproveitamento do material.

3.3.2. Propriedades no Estado Endurecido

Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2022), o concreto endurecido é definido como aquele que se encontra no estado sólido e que desenvolveu resistência mecânica. Assim, a aceitação de um lote de concreto tem como principal parâmetro de análise a resistência mecânica do material, pois é essa propriedade que garante a segurança da edificação com o decorrer do tempo, ou seja, a capacidade de suportar às solicitações ao longo de sua vida útil.

A divisão da estrutura em lotes para a realização dos ensaios de resistência, de acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2022), deve seguir os limites da Tabela 3.6. De cada lote deve ser retirada uma amostra definida de acordo com o controle tecnológico implementado.

Tabela 3.6 – Valores máximos para formação de lotes de concreto

Identificação (o mais exigente para cada caso)	Solicitação principal dos elementos da estrutura	
	Compressão ou compressão e flexão	Flexão Simples
Volume de concreto	50 m ³	100 m ³
Número de andares	1	1
Tempo de concretagem	Três dias de concretagem	

Fonte: ABNT NBR 12655 (2022), adaptado

A amostragem deve ser coletada de forma aleatória durante a concretagem, segundo a NBR 16886 (ABNT, 2020b). Cada exemplar é, então, constituído de dois corpos de prova da mesma amassada, para cada idade de rompimento, moldados em conjunto, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015b). Os corpos de prova são submetidos ao ensaio de resistência à compressão em laboratório, seguindo as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018a). Toma-se como resistência do exemplar o maior dos dois valores obtidos por meio do ensaio de resistência a compressão.

Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2022), o controle de resistência pode ser de dois tipos: o controle estatístico por amostragem parcial e o controle do concreto por amostragem total. O primeiro deles prevê uma fórmula de cálculo do valor estimado da resistência característica à compressão ($f_{ck,est}$) do lote do concreto em análise. Já no segundo tipo de controle, a análise da conformidade se baseia em cada betonada. Ambos são detalhados a seguir:

3.3.2.1. Controle do Concreto por Amostragem Total

Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2022), o controle tecnológico do concreto por amostragem total, é definido como aquele em que todas as betonadas são amostradas e representadas por um exemplar que define a resistência à compressão do concreto na betonada em análise. Assim, o valor da resistência característica à compressão do concreto estimada ($f_{ck,est}$) é obtida pela Equação 3.2.

$$f_{ck,est} = f_{c,betonada} \quad \text{Equação 3.2}$$

Sendo:

$f_{c,betonada}$ o valor de resistência à compressão do exemplar que representa o concreto da betonada em análise

No controle estatístico por amostragem total, a rastreabilidade no momento do lançamento é opcional, conforme indica a Tabela 3.7. Contudo, a aplicação ou não da rastreabilidade implica em diferentes recomendações para a realização dos ensaios não destrutivos quando constata-se a não conformidade de um lote, conforme será elucidado posteriormente.

Tabela 3.7 – Rastreabilidade e formação de lotes segundo a amostragem adotada

Tipo de controle (ABNT NBR 12655)	Mapeado (rastreabilidade)		Formação de lotes	Quantidade de testemunhos por lote	
	No lançamento	Por ensaios não destrutivos			
Amostragem Total	Sim	opcional	Cada lote corresponde ao volume de uma betonada ou de um caminhão-betoneira	Aplicado em um elemento estrutural	2
				Aplicado em mais do que um elemento estrutural	3
	Não	Sim	Conforme o mapeamento. Cada lote deve corresponder ao conjunto contido em um intervalo restrito de resultados dos ensaios não destrutivos	Até 8m ³	3
				Maior que 8m ³ e menor que 50m ³	4
Amostragem Parcial	Indiferente	Sim	Conforme o mapeamento. Cada lote deve corresponder ao conjunto contido em um intervalo restrito de resultados dos ensaios não destrutivos	Até 8m ³	4
				Maior que 8m ³ e menor que 50m ³	6
Casos Excepcionais	Vale o critério de amostragem parcial conforme ABNT NBR 12655 (concreto parado na obra)				

Fonte: ABNT NBR 7680 (2015)

3.3.2.2. Controle Estatístico do Concreto por Amostragem Parcial

O controle estatístico do concreto por amostragem parcial prevê a extração de exemplares em betonadas diferentes, com amostras de no mínimo 6 exemplares para os concretos do grupo I (classes até ou iguais a C50) e 12 exemplares para concretos do grupo II (classes superiores a C50), conforme previsto na NBR 8953 (ABNT, 2015a).

- a. Para lotes com número de exemplares entre 6 e 20, o valor da resistência característica à compressão ($f_{ck,est}$), na idade em especificação, é calculado utilizando a Equação 3.3.

$$f_{ck,est} = 2 \times \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}}{m-1} - f_m \quad \text{Equação 3.3}$$

Sendo,

m é igual à metade do número de exemplares, desprezando o valor mais alto de n quando for ímpar;

$f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}$ são os valores das resistências dos exemplares em ordem crescente.

Não se pode tomar como valor de $f_{ck,est}$ valor menor que $\Psi_6 \times f_1$, sendo adotado para Ψ_6 os valores da Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Valores de Ψ_6

Condição de preparo	Número de exemplares (n)										
	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	≥ 16
A	0,82	0,86	0,89	0,91	0,92	0,94	0,95	0,97	0,99	1,00	1,02
B ou C	0,75	0,80	0,84	0,87	0,89	0,91	0,93	0,96	0,98	1,00	1,02

Fonte: ABNT NBR 12655 (2022)

- b. Para lotes com amostras com um número de exemplares maior que 20, utiliza-se a Equação 3.4.

$$f_{ck,est} = f_{cm} - 1,65 \times s_d \quad \text{Equação 3.4}$$

Sendo,

f_{cm} é a resistência média dos exemplares do lote, em megapascal (MPa)

s_d é o desvio padrão dessa amostra de n exemplares, em megapascal (MPa), calculado utilizando a Equação 3.5.

$$s_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (f_i - f_{cm})^2} \quad \text{Equação 3.5}$$

No controle estatístico por amostragem parcial, a rastreabilidade no momento do lançamento é indiferente, afinal, têm-se a verificação da resistência à compressão apenas de uma parte das betonadas. Por isso, conforme indica a Tabela 3.7, a realização de ensaios não destrutivos para rastreabilidade do lançamento em casos de não conformidade torna-se obrigatória.

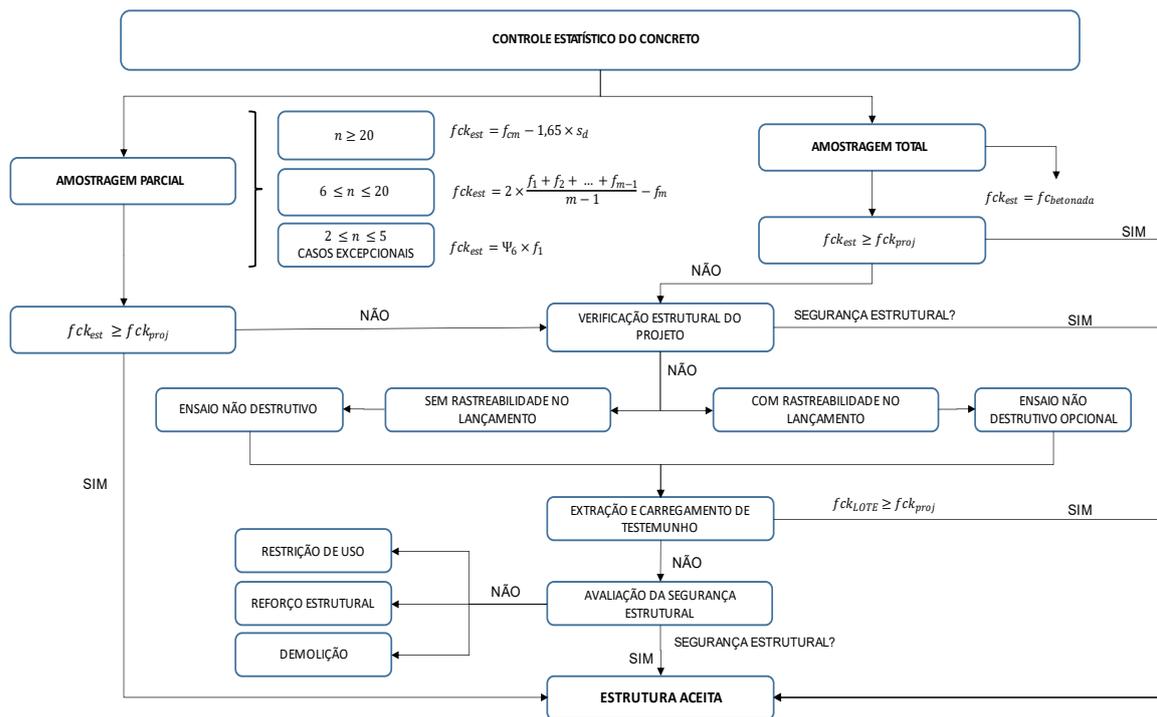
c. Casos Excepcionais

Para casos em que o volume da betonada é pequeno e que o número total de betonadas seja maior que o de exemplares da amostra que representa o respectivo lote, pode-se dividir a estrutura em lotes correspondentes a no máximo 10 m³ e amostrar com número de exemplares entre 2 e 5, sendo a resistência característica calculada pela Equação 3.6.

$$f_{ck,est} = \Psi_6 \times f_1 \quad \text{Equação 3.6}$$

Definidos os diferentes tipos de controle estatístico do concreto para realização do controle tecnológico, a Figura 3.5 apresenta resumidamente todas as determinações previstas para cada controle adotado.

Figura 3.5 – Fluxograma resumo do controle tecnológico



Os lotes de concreto da amostragem parcial e os exemplares no caso de amostragem total devem ser aceitos quando o valor estimado da resistência característica à compressão atender à resistência característica do concreto à compressão especificada pelo projetista estrutural ($f_{ck,est} \geq f_{ck}$). Em caso de não conformidade, deve-se seguir as recomendações da NBR 7680 (ABNT, 2015c).

3.3.3. Recomendações para não conformidade do controle tecnológico do concreto

3.3.3.1. Revisão do projeto e recomendações iniciais

Segundo a NBR 7680 (ABNT, 2015c), quando for constatada a não conformidade segundo os critérios da NBR 12655 (ABNT, 2022), recomenda-se a realização de um estudo crítico sobre a real necessidade da operação de extração, com objetivo de evitar extrações desnecessárias que minorem a capacidade resistiva da edificação.

Deve ser solicitado ao respectivo engenheiro projetista que seja feita uma verificação de segurança estrutural com base no valor da resistência característica à compressão estimada ($f_{ck,est}$). A partir deste procedimento, têm-se duas possibilidades:

- É constatada a segurança estrutural utilizando-se o valor da resistência característica à compressão estimada, não sendo necessária a extração de testemunhos;

- Não é constatada a segurança estrutural utilizando-se o valor da resistência característica à compressão estimada, sendo necessário um planejamento de extração de testemunhos envolvendo todas as partes.

3.3.3.2. Ensaio não destrutivo

Quando não se realiza a rastreabilidade do concreto no lançamento do material em obra e a depender do tipo de controle tecnológico empregado, torna-se necessária a realização de ensaios não destrutivos para que se localize em quais elementos da edificação o concreto não conforme foi lançado e assim sejam realizados os procedimentos de extração, conforme indica a Tabela 3.7.

Pode-se utilizar, neste caso, tanto o ensaio de dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão, preconizado pela NBR 7584 (ABNT, 2012a), quanto o ensaio de determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica, preconizado pela NBR 8802 (ABNT, 2019).

Ainda segundo a NBR 7680 (ABNT, 2015c), os ensaios não destrutivos podem ser utilizados também para verificação da homogeneidade do concreto em um lote identificado por mapeamento.

3.3.3.3. Extração de testemunho

Conforme expresso pela NBR 12655 (ABNT, 2022), sendo realizado um controle tecnológico por amostragem parcial ou por amostragem total, em caso de não conformidade após a realização de estudos prévios com o engenheiro responsável e depois da realização ou não dos ensaios não destrutivos, deve-se seguir os procedimentos expostos na NBR 7680 (ABNT, 2015c), que diz respeito a extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de concreto para medição da resistência à compressão axial.

Os resultados obtidos por meio dos ensaios descritos na NBR 7680 (ABNT, 2015c) são úteis na medida em que:

- Servem como respaldo para aceitação do concreto em caso de não conformidade atestada pelos critérios da NBR 12655 (ABNT, 2022);
- Servem como respaldo para avaliação de segurança estrutural de obras em andamento, nos casos de não conformidade atestada pelos critérios da NBR 12655 (ABNT, 2022);
- Servem como respaldo para verificação da segurança estrutural de obras existentes, em que a resistência à compressão deva ser conhecida.

Conforme estipulado pela NBR 7680 (ABNT, 2015c), a extração deve ser feita com equipamentos que permitam a obtenção de amostras homogêneas e íntegras. Para corpos de prova cilíndricos, recomenda-se o uso de um conjunto da extratora com cálice e coroa diamantada, permitindo a extração nas dimensões estabelecidas sem prejuízos excessivos à estrutura original. Após a extração, deve-se garantir a reconstituição minimamente igual às condições prévias da estrutura, devendo, para isso, o local deve ser preenchido com concreto compatível com o especificado para o elemento estrutural em questão.

Para a determinação da resistência de ruptura à compressão axial ($f_{ci,ext}$) deve-se seguir as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018a) sendo necessário que o testemunho seja carregado até sua total desagregação e que o resultado obtido seja corrigido por coeficientes relacionados com: a dimensão do testemunho, o efeito do bronqueamento, direção da extração em relação ao lançamento do concreto e efeito da umidade do testemunho definidos na NBR 7680 (ABNT, 2015c).

A resistência característica do lote para verificação da segurança estrutural deve ser calculada como a média dos resultados individuais do lote e a resistência do projeto a ser utilizada na verificação da estrutura deve ser calculada utilizando-se o coeficiente de minoração previsto na ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014a).

3.3.3.4. Avaliação da segurança estrutural

Para os casos em que for constatada a não aceitação do concreto mesmo após a extração do testemunho, realiza-se uma avaliação de segurança estrutural de acordo com metodologias, como a prova de carga.

Segundo a NBR 9607 (ABNT, 2019b), prova de carga pode ser definido como um conjunto de atividades destinado a analisar o desempenho de uma estrutura por meio de medição e controle de efeitos causados pela aplicação de ações externas de intensidade e natureza previamente estabelecidas. Essa norma também estabelece os procedimentos dos ensaios de prova de carga. Contudo, deve-se salientar que para os casos de não conformidade com risco de ruptura frágil, a prova de carga não é um recurso recomendado.

Para que seja realizado o ensaio de prova de carga, deve-se conhecer os aspectos relativos à obra em sua integridade, isto é: projeto, materiais, controle de execução e estado de conservação e utilização. A partir destes conhecimentos são definidos os critérios do ensaio, como: determinação da capacidade portante da estrutura; dimensionamento do

carregamento; escolha dos efeitos e pontos da estrutura a serem controlados; previsão teórica desses efeitos; dentre outros.

Estabelecido o objetivo do ensaio, realiza-se o carregamento em etapas, sendo a etapa de carregamento máximo mantida por pelo menos 12h e sendo aferidos os respectivos valores ao longo do ensaio, juntamente com a verificação dos deslocamentos-limites estabelecidos em projeto. É dada continuidade apenas com a verificação da segurança da estrutura em avaliação.

Os valores previstos são comparados com os valores obtidos, juntamente com a verificação de qualquer anomalia na estrutura ao longo do carregamento realizado, sendo então estabelecidas as condições de utilização da estrutura em análise ou no caso de aceitação da estrutura, se ela será ou não aceita conforme as condições de projeto.

3.3.3.5. Não conformidade final

Constatada a não conformidade final de uma parte ou então de toda a estrutura analisada, deve-se escolher a aplicação de uma das três seguintes alternativas:

- Determinação das restrições de uso da estrutura;
- Realização de um projeto de reforço estrutural;
- Demolição total ou parcial da estrutura.

3.4. CÁLCULO DO DESVIO-PADRÃO

As medidas de posição fornecem, em geral, uma ideia do comportamento do conjunto de dados em análise, contudo, faz-se necessário compreender a variabilidade do conjunto de dados. Por exemplo, em um lote em que se faça a extração de corpos de prova para medição da resistência à compressão, saber que a média destes valores é de 30 MPa não é conclusivo, pois a mesma média pode ser obtida com variabilidades distintas deste conjunto de dados.

O desvio padrão torna-se útil na medida em que indica o afastamento da massa de dados em análise da posição central dessa massa e na mesma unidade de medida dos dados estudados. Assim, é possível identificar numericamente como a variável estudada está dispersa no espaço amostral no qual está inserida. O uso dos indicadores de posição juntamente com os de dispersão permite, então, uma avaliação estatística mais completa.

O desvio padrão a ser calculado é importante sob duas perspectivas. Na primeira delas, segundo o ACI 214R-02 (2002), para avaliar o comportamento dos dados obtidos segundo modelos de distribuição de probabilidades, como a distribuição normal, sendo essa

curva classificada como alta e estreita quanto melhor for a produção e o controle do concreto. Além disso, o desvio padrão torna-se importante para o cálculo da resistência de dosagem.

Segundo o ACI 214R-02, a variação na resistência característica à compressão do concreto pode ser fruto de possíveis variações nos métodos de produção do concreto ou ainda fruto de possíveis variações nas propriedades ou proporções nos materiais de composição do concreto causadas ao longo da mistura, produção, transporte ou até condições climáticas locais. Por isso, apenas um resultado proveniente do ensaio de resistência à compressão não é suficiente para as análises estatísticas referentes ao concreto. Com ao menos 10 resultados de ensaios realizados para corpos de prova da mesma idade, é possível estabelecer níveis de qualidade para o controle de produção do concreto, conforme apresentado na Tabela 3.9, em relação ao valor de desvio padrão obtido.

Tabela 3.9 – Níveis de controle com base no desvio-padrão

Variação Geral					
Classe de operação	Desvio-padrão para diferentes níveis de controle (MPa)				
	Excelente	Muito bom	Bom	Baixo	Muito Baixo
Testes gerais de construção	Abaixo de 2,8	2,8 a 3,4	3,4 a 4,1	4,1 a 4,8	Acima de 4,8
Bateladas de laboratório	Abaixo de 1,4	1,4 a 1,7	1,7 a 2,1	2,1 a 2,4	Acima de 2,4

Fonte: ACI 214R-02 (2002), adaptado

Conhecendo então o desvio padrão da resistência à compressão dos grupos de concreto é possível avaliar o controle realizado na produção do concreto e torna-se possível aumentar a assertividade da resistência de dosagem do concreto. Com o aumento dessa assertividade, aumenta-se também a probabilidade de aceitação do concreto fornecido pela concreteira, pois crescem as probabilidades de se ter um fck_{est} superior ao f_{ck} requerido em projeto.

3.5. DISTRIBUIÇÃO NORMAL

A distribuição Normal representa o comportamento de diversos fenômenos aleatórios, entre eles a distribuição da resistência do concreto. Segundo Magalhães e Lima (2007), uma variável aleatória contínua tem distribuição normal quando sua função de densidade é dada pela Equação 3.7, onde os parâmetros μ e σ^2 são a média e a variância da distribuição, respectivamente.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Equação 3.7}$$

O cálculo de probabilidade para a distribuição normal é realizado por métodos numéricos, com o auxílio da Tabela 3.10. Para isso, deve-se transformar o valor da amostra (X) em um valor padrão (Z), dado pela Equação 3.8.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad \text{Equação 3.8}$$

A distribuição normal padrão possui média 0 e variância 1 e possibilita o cálculo de ocorrência de qualquer valor de X pertencente a um dado intervalo de interesse.

Tabela 3.10 – Probabilidade de ocorrência do valor padrão Z

Zo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,0000	0,0040	0,0080	0,0120	0,0160	0,0199	0,0239	0,0279	0,0319	0,0359
0,1	0,0398	0,0438	0,0478	0,0517	0,0557	0,0596	0,0636	0,0675	0,0714	0,0753
0,2	0,0793	0,0832	0,0871	0,0910	0,0948	0,0987	0,1026	0,1064	0,1103	0,1141
0,3	0,1179	0,1217	0,1255	0,1293	0,1331	0,1368	0,1406	0,1443	0,1480	0,1517
0,4	0,1554	0,1591	0,1628	0,1664	0,1700	0,1736	0,1772	0,1808	0,1844	0,1879
0,5	0,1915	0,1950	0,1985	0,2019	0,2054	0,2088	0,2123	0,2157	0,2190	0,2224
0,6	0,2257	0,2291	0,2324	0,2357	0,2389	0,2422	0,2454	0,2486	0,2517	0,2549
0,7	0,2580	0,2611	0,2642	0,2673	0,2704	0,2734	0,2764	0,2794	0,2823	0,2852
0,8	0,2881	0,2910	0,2939	0,2967	0,2995	0,3023	0,3051	0,3078	0,3106	0,3133
0,9	0,3159	0,3186	0,3212	0,3238	0,3264	0,3289	0,3315	0,3340	0,3365	0,3389
1,0	0,3413	0,3438	0,3461	0,3485	0,3508	0,3531	0,3554	0,3577	0,3599	0,3621
1,1	0,3643	0,3665	0,3686	0,3708	0,3729	0,3749	0,3770	0,3790	0,3810	0,3830
1,2	0,3849	0,3869	0,3888	0,3907	0,3925	0,3944	0,3962	0,3980	0,3997	0,4015
1,3	0,4032	0,4049	0,4066	0,4082	0,4099	0,4115	0,4131	0,4147	0,4162	0,4177
1,4	0,4192	0,4207	0,4222	0,4236	0,4251	0,4265	0,4279	0,4292	0,4306	0,4319
1,5	0,4332	0,4345	0,4357	0,4370	0,4382	0,4394	0,4406	0,4418	0,4429	0,4441
1,6	0,4452	0,4463	0,4474	0,4484	0,4495	0,4505	0,4515	0,4525	0,4535	0,4545
1,7	0,4554	0,4564	0,4573	0,4582	0,4591	0,4599	0,4608	0,4616	0,4625	0,4633
1,8	0,4641	0,4649	0,4656	0,4664	0,4671	0,4678	0,4686	0,4693	0,4699	0,4706
1,9	0,4713	0,4719	0,4726	0,4732	0,4738	0,4744	0,4750	0,4756	0,4761	0,4767
2,0	0,4772	0,4778	0,4783	0,4788	0,4793	0,4798	0,4803	0,4808	0,4812	0,4817
2,1	0,4821	0,4826	0,4830	0,4834	0,4838	0,4842	0,4846	0,4850	0,4854	0,4857
2,2	0,4861	0,4864	0,4868	0,4871	0,4875	0,4878	0,4881	0,4884	0,4887	0,4890
2,3	0,4893	0,4896	0,4898	0,4901	0,4904	0,4906	0,4909	0,4911	0,4913	0,4916
2,4	0,4918	0,4920	0,4922	0,4925	0,4927	0,4929	0,4931	0,4932	0,4934	0,4936
2,5	0,4938	0,4940	0,4941	0,4943	0,4945	0,4946	0,4948	0,4949	0,4951	0,4952
2,6	0,4953	0,4955	0,4956	0,4957	0,4959	0,4960	0,4961	0,4962	0,4963	0,4964
2,7	0,4965	0,4966	0,4967	0,4968	0,4969	0,4970	0,4971	0,4972	0,4973	0,4974
2,8	0,4974	0,4975	0,4976	0,4977	0,4977	0,4978	0,4979	0,4979	0,4980	0,4981
2,9	0,4981	0,4982	0,4982	0,4983	0,4984	0,4984	0,4985	0,4985	0,4986	0,4986
3,0	0,4987	0,4987	0,4987	0,4988	0,4988	0,4989	0,4989	0,4989	0,4990	0,4990
3,1	0,4990	0,4991	0,4991	0,4991	0,4992	0,4992	0,4992	0,4992	0,4993	0,4993
3,2	0,4993	0,4993	0,4994	0,4994	0,4994	0,4994	0,4994	0,4995	0,4995	0,4995
3,3	0,4995	0,4995	0,4995	0,4996	0,4996	0,4996	0,4996	0,4996	0,4996	0,4997
3,4	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4998
3,5	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998
3,6	0,4998	0,4998	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999
3,7	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999
3,8	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999
∞	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000

3.6. CAUSAS DE DESCONFORMIDADE NO CONCRETO

A desconformidade do concreto usinado, que leva a sua não aceitação, está relacionada a diversas causas. Essas podem estar relacionadas às características dos materiais utilizados durante a produção do concreto, a qualidade da mistura, o método do transporte e/ou com as condições de realização do ensaio em laboratório.

3.6.1. Características do cimento

O cimento é um material em pó bastante fino, composto por calcário, argila, minério de ferro e gesso, sendo que esses materiais formam quatro compostos principais: silicato tricálcico (C_3S); silicato dicálcico (C_2S); Aluminato tricálcio (C_3A); e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). Os silicatos (C_3S e C_2S) são os principais responsáveis pela resistência da pasta de cimento, enquanto os aluminatos possuem alto calor de hidratação, baixa resistência a águas agressivas e sua contribuição para a resistência do concreto é desprezível, a presença desses compostos é visto como indesejada (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Para se garantir que o cimento utilizado no concreto seja de qualidade, devem ser realizados ensaios no cimento em relação à sua finura, tempo de pega, expansibilidade e resistência. Sendo esses requisitos para o cimento Portland definidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018b) que leva em consideração o tipo de cimento e sua classe, sendo os valores apresentados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Requisitos físicos e mecânicos para o cimento Portland

Sigla	Classe	Finura – Resíduo na peneira 75 μ m (%)	Tempo de início de pega (min)	Expansibilidade a quente (mm)	Resistência à compressão (MPa)			
					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
CP I CP I-S	25	$\leq 12,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$
CP II-E CP II-F CP II-Z	32	$\leq 12,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$
	40	$\leq 10,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	$\geq 40,0$
CP III CP IV	25	$\leq 8,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$
	32	$\leq 8,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$
	40	$\leq 8,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 12,0$	$\geq 23,0$	$\geq 40,0$
CP V	ARI	$\leq 6,0$	≥ 60	≤ 5	$\geq 14,0$	$\geq 24,0$	$\geq 34,0$	-
CPB Estrutural	25	$\leq 12,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$
	32	$\leq 12,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$
	40	$\leq 12,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	$\geq 40,0$
CPB não estrutural	-	$\leq 12,0$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 5,0$	$\geq 7,0$	≥ 82

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018), adaptado

A finura do cimento, diz respeito a área superficial disponível para a hidratação, sendo fundamental para o desenvolvimento da resistência (NEVILLE; BROOKS, 2013). A determinação do índice de finura pode ser determinada pelo ensaio com peneira, regido pela

NBR 11579 (ABNT, 2012b). O índice de finura também pode ser determinado pelo peneirador aerodinâmico, preconizado pela NBR 12826 (ABNT, 2014b).

Os ensaios de tempo de pega e de expansibilidade devem ser realizados com pasta de consistência normal, obtida seguindo as recomendações da NBR 16606 (ABNT, 2018c). Segundo (NEVILLE; BROOKS, 2013), o tempo de pega se refere ao enrijecimento da pasta de cimento, causada principalmente pela hidratação do C₃S e C₂S, sendo esse ensaio regido pela NBR 16607 (ABNT, 2018d). A expansibilidade diz respeito à alteração de volume da pasta de cimento após a pega, devendo essa ser limitada, pois quando ocorre em excesso pode provocar a desagregação do concreto, o ensaio dessa propriedade é regido pela NBR 11582 (ABNT, 2016).

A resistência do cimento à compressão é normalizada pela NBR 7215 (ABNT, 2019c), utilizando uma argamassa com areia normal, especificada pela NBR 7214 (ABNT, 2015d). Devendo seguir os valores mínimos apresentados na Tabela 3.11.

3.6.2. Características dos agregados

Os agregados ocupam, aproximadamente 3/4 do volume do concreto e afetam a sua capacidade de resistência, durabilidade e desempenho estrutural (NEVILLE; BROOKS, 2013). Sendo a aderência uma das principais propriedades mecânicas que afetam as propriedades do concreto. A aderência reflete a capacidade de penetração e contato efetivo entre o agregado e a pasta cimentícia. Em geral, agregados macios, porosos e de partículas mineralógicas heterogêneas resultam em uma melhor aderência (NEVILLE; BROOKS, 2013).

As propriedades físicas dos agregados são as que afetam de forma mais significativa o concreto, sendo elas: massa específica; porosidade e absorção; teor de umidade; presença de substâncias deletérias e contaminação por sais. Além das propriedades físicas deve-se considerar a granulometria, observando a distribuição das dimensões do agregado. Dessa forma, a concreteira deve ter especial atenção para a escolha desse material, pois esse pode introduzir variabilidades no concreto responsáveis por sua não aceitação na estrutura.

3.6.3. Método de transporte

A distância e o tempo de transporte são considerações importantes para o concreto usinado. Uma vez que o concreto é preparado na central e enviado para obra por meio de caminhões betoneira. Segundo a NBR 14931 (ABNT, 2004), o intervalo de tempo entre o

primeiro contato da água de amassamento com o cimento e o final da concretagem não deve ser superior a 2h30min.

3.6.4. Condições de realização do ensaio

Segundo o ACI 214R-02 (2002), variações nos resultados de resistência à compressão podem ser causadas tanto por variações nas condições de realização do ensaio, quanto por variações nas propriedades ou na proporção dos materiais constituintes do concreto. No primeiro caso, as variações são afetadas por variações na amostragem, moldagem, consolidação, transporte, cura, cobrimento e no próprio teste das amostras. Também por esse motivo, torna-se necessária a realização do ensaio em dois corpos de prova para que se determine a resistência à compressão de um exemplar.

Na análise estatística, mede-se o desvio padrão devido às condições de realização do ensaio a partir de no mínimo 10 testes realizados em concretos com a mesma idade. Além disso, pode-se estimar o desvio dos valores obtidos, comparando-se o desvio padrão calculado com a média dos resultados obtidos.

No entanto, erros nas condições de realização do ensaio podem não ser necessariamente detectados pela comparação de testes realizados nas mesmas amostras de concreto, especialmente caso sejam erros consistentes.

4. METODOLOGIA

Nesta pesquisa foram realizados estudos de indicadores estatísticos para concretos usinados de mesma classe aplicados no Distrito Federal. Para isso, construiu-se um banco de dados contendo resultados de ensaio laboratoriais realizados com concretos de classes de resistência C30 e C40. Também foram verificadas as condições de moldagem, transporte e cura dos corpos de prova cilíndricos, além dos procedimentos para a realização dos ensaios de corpos de prova, verificando o atendimento às suas respectivas normas técnicas vigentes.

O banco de dados foi construído a partir de uma parceria entre os autores da presente pesquisa, o Sindicato da Indústria da Construção Civil do Distrito Federal (Sinduscon-DF) e o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI). Foram utilizados os dados do concreto empregado em obras privadas e ensaiados pelo corpo técnico do SENAI. Os dados coletados foram submetidos a análises estatísticas, definidas de acordo com a quantidade de resultados obtidos.

Como a moldagem dos corpos de prova é um fator que pode induzir variabilidade aos resultados dos ensaios realizados, os autores foram aos canteiros participantes verificar se os procedimentos seguiam as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015b). Também foi realizada visita ao laboratório do SENAI, verificando as condições de ensaio e armazenamento dos corpos de prova. Com isso, buscou-se garantir que os ensaios das obras fossem realizados com exemplares apropriados e que o ensaio estivesse de acordo com as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018a).

4.1. PARCERIA UNB, SINDUSCON-DF E SENAI

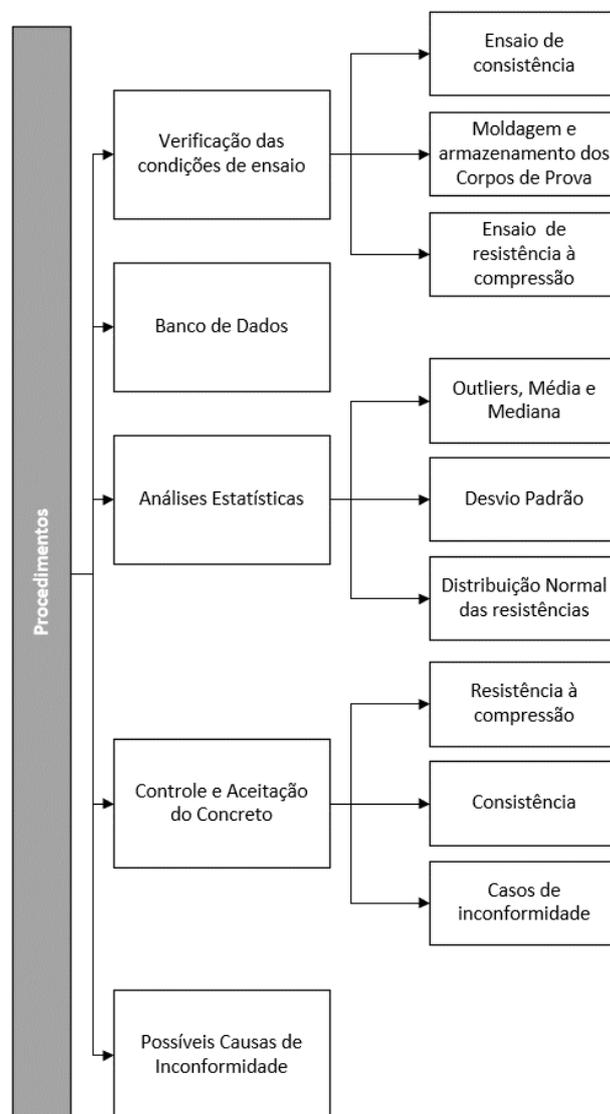
O Sinduscon-DF, por meio do Projeto Indicadores do Concreto, possibilitou a realização da pesquisa, fornecendo dados existentes sobre o setor da construção civil do Distrito Federal, além de ter promovido o contato com as empresas interessadas em participar da pesquisa. Dessa forma, com a colaboração dessas instituições, elaborou-se um banco de dados relativo ao concreto utilizado na região.

Todos os ensaios do concreto foram realizados no SENAI. A instituição possui laboratórios creditados pelo Inmetro com base na NBR ISO/IEC 17025/2017, para a realização de ensaios relacionados ao concreto.

Os autores observaram os procedimentos de moldagem dos corpos de prova cilíndricos em canteiro, verificando o atendimento a NBR 5738 (ABNT, 2015b). Os

pesquisadores também realizaram a organização do banco de dados conforme as classes de resistência do concreto, além do tratamento dos dados por meio de análise estatística. Dessa forma, as atividades desenvolvidas estão apresentadas de forma resumida na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Fluxograma com as atividades que foram desenvolvidas na pesquisa



4.2. VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO

Para se averiguar a confiabilidade dos resultados dos ensaios de consistência e de resistência à compressão, foram realizadas visitas aos canteiros de obra participantes da pesquisa e ao laboratório do SENAI. As visitas foram realizadas, verificando se os procedimentos eram executados conforme as normas técnicas específicas vigentes, reduzindo a ocorrência de variabilidade dos resultados devido a não conformidade de execução dos ensaios, o que também proporcionou uma maior confiabilidade aos resultados analisados.

4.2.1. Ensaio de consistência

A verificação de execução do ensaio de consistência foi realizada em campo por meio de até duas visitas em canteiro, nos canteiros 01 e 02. O ensaio foi realizado com o concreto em estado fresco, utilizando o método do abatimento do tronco de cone, regido pela NBR 16889 (ABNT, 2020a), adequado para classes de abatimento no intervalo de S10 e S220, as quais englobam as consistências solicitadas para os concretos em estudo. O ensaio foi realizado utilizando um molde de metal, com espessura superior a 1,5 mm, em formato de tronco de cone com diâmetro da base inferior igual a 200 ± 2 mm; base superior com diâmetro igual a 100 ± 2 mm e altura igual a 300 ± 2 mm. As bases do molde devem ser paralelas entre si e perpendiculares ao eixo do cone.

A haste de adensamento era de aço, com diâmetro de 16 ± 2 mm e comprimento de 600 mm a 800 mm, similar à haste para adensamento mecânico dos corpos de prova. O ensaio foi realizado sobre uma placa de base metálica com espessura superior ou igual a 3 mm, plana, de geometria retangular, com dimensão mínima de 500 mm. A medição do abatimento foi realizada com régua milimetradas.

Para a realização do ensaio, prosseguiu-se com o umedecimento do molde e da placa de base e com o posicionamento do molde sobre a placa, o molde foi preenchido com os pés do operador posicionados sobre as aletas, mantendo o molde estável. O concreto foi posto no molde em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde. Cada camada foi adensada com 25 golpes, distribuídos uniformemente em toda a seção. Após o preenchimento do molde, ele foi retirado com um movimento constante para cima, sendo retirado completamente de 4 s a 6 s.

Após a retirada do molde, foi realizada a medição do abatimento do concreto, determinando a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo de prova, com aproximação de 5 mm. Seguindo as recomendações da NBR 16889 (ABNT, 2020a), a operação completa de enchimento e retirada do molde foi realizada em um intervalo de 150 s. Sendo a duração total do ensaio, contada a partir da retirada da amostra, medida em torno de 10 minutos.

4.2.2. Moldagem e armazenamento dos corpos de prova

A verificação das condições de moldagem de corpos de prova ocorreu por meio de até duas avaliações práticas em todos os canteiros participantes da pesquisa, nos quais avaliou-se a execução conforme as orientações principais da NBR 5738 (ABNT, 2015b).

Essa norma especifica as condições para os moldes, adensamento, manuseio, transporte e cura dos corpos de prova. Para a definição da quantidade de amostras, seguiu-se a ABNT 12655 (ABNT, 2022). Essas amostras foram retiradas de acordo com a NBR 16886 (ABNT, 2020b), de forma aleatória e, ainda que o procedimento não tenha sido feito entre a descarga de 15 % e 85 % do volume de concreto do caminhão, conforme recomendado.

Em conformidade com a NBR 5738 (ABNT, 2015b), os moldes foram concebidos com características geométricas bem definidas, tendo tolerância para suas medidas de 1% para o diâmetro e 2% para a altura. Os corpos de prova tinham diâmetro de 10 cm, de acordo com o concreto utilizado em cada obra analisada. Já a altura do molde era igual ao dobro de seu diâmetro.

Os moldes foram previamente revestidos internamente com uma camada de óleo mineral ou outros lubrificantes não reagentes com o concreto. Após a preparação dos moldes realizou-se a moldagem dos corpos de prova, seguindo o preenchimento do molde com camadas uniformes, a quantidade de camadas deve seguir o exposto na Tabela 4.1, retirada da NBR 5738 (ABNT, 2015b).

Tabela 4.1 – Número de camadas para moldagem dos corpos de prova

Tipo de CP	Dimensão básica (d) (mm)	Número de camadas em função do tipo de adensamento		Número de golpes para adensamento manual
		Mecânico	Manual	
Cilíndrico	100	1	2	12
	150	2	3	25
	200	2	4	50
	250	3	5	75
	300	3	6	100
	450	5	-	-

Nota: Para concretos com abatimento superior a 160 mm, a quantidade de camadas deve ser reduzida à metade.

Fonte: ABNT NBR 5738 (2015)

Ainda de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015b), a forma de adensamento foi escolhida levando-se em consideração a classe de consistência do concreto. O corpo de prova foi adensado de acordo com a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Método de adensamento

Classe	Abatimento (mm)	Método de adensamento
S10	$10 \leq A < 50$	Mecânico
S50	$50 \leq A < 100$	Mecânico ou manual
S100	$100 \leq A < 160$	
S160	$160 \leq A < 220$	
S220	$A \geq 220$	Manual

Fonte: ABNT NBR 5738 (2015)

Como foi realizado o adensamento de forma manual, utilizou-se uma haste de aço cilíndrica, com superfície lisa com $16,0 \pm 0,2$ mm e comprimento entre 600 mm e 800 mm. Os golpes foram distribuídos uniformemente em toda a seção do molde, penetrando aproximadamente 20 mm na camada inferior.

Caso fosse utilizado o adensamento mecânico com vibradores por imersão, esse equipamento deveria estar dentro dos requisitos da ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015b). Segundo a norma, o diâmetro do elemento vibrante de vibradores internos deve estar entre 19 mm e 1/4 da dimensão básica dos corpos de prova. As camadas obtidas de acordo com a Tabela 4.1, devem ser vibradas apenas uma vez, com o elemento vibrante introduzido no centro do molde. Durante o procedimento, deve-se evitar que o equipamento toque no contorno do molde, a partir da segunda camada, o vibrador deve penetrar 20 mm na camada anterior. Em cada camada deve ser realizado o fechamento do vazio deixado pelo equipamento, batendo levemente na lateral da face do molde.

Em conformidade com a NBR 5738 (ABNT, 2015b), a última camada foi moldada com excesso de concreto, possibilitando o seu rasamento após a realização do seu adensamento. O rasamento da superfície com a borda do molde foi realizado utilizando-se uma colher de pedreiro.

Ainda em conformidade com a NBR 5738 (ABNT, 2015b), a moldagem dos corpos de prova ocorreu no local onde esses foram armazenados. No transporte evitou-se qualquer tipo de perturbação ao concreto ou à sua superfície. Após o endurecimento, o concreto foi transportado para o laboratório, onde foi realizado o ensaio de resistência à compressão, sendo o transporte realizado em sua forma.

Em conformidade com a NBR 5738 (ABNT, 2015b), a cura inicial deve ocorrer durante as primeiras 24h para corpos de prova cilíndricos de concreto. Durante esse período, o corpo de prova foi colocado em uma superfície horizontal rígida e livre de ações que

pu dessem perturbar o concreto. O local oferecia proteção contra intempéries e os moldes foram cobertos com material não reativo e não absorvente, de forma a evitar a perda de água do concreto para o ambiente.

Nessa pesquisa os corpos de prova foram utilizados para comprovar a qualidade e a uniformidade do concreto utilizado na construção. Para essa finalidade, após a cura inicial, os corpos de prova foram transportados do canteiro para o laboratório, desmoldados e identificados. Em seguida, armazenados até o momento de execução dos ensaios em câmara úmida, com umidade relativa do ar superior a 95%.

4.2.3. Ensaio de resistência à compressão

Foi realizada uma visita às instalações do laboratório do SENAI para se verificar o atendimento aos requisitos de ensaio de compressão dos corpos de prova cilíndricos especificados na NBR 5739 (ABNT, 2018a). Sendo, para isso, avaliadas visualmente as condições de regularização de superfície, identificação dos corpos de prova, cura e execução do ensaio, além de obter informações sobre a calibração e manutenção dos equipamentos.

Os procedimentos de regularização da superfície e cura dos corpos de prova são regidos pela NBR 5738 (ABNT, 2015b). A regularização da superfície ocorreu de tal modo que as bases passaram a se caracterizar planas e perpendiculares ao eixo longitudinal do corpo de prova, de forma que fosse evitada a ocorrência de concentração de tensões durante a realização do ensaio. Após esse procedimento, realizou-se a medição das dimensões dos corpos de prova, sendo ensaiados apenas exemplares com relação altura/diâmetro igual ou inferior a 2,06, sendo necessário correções para relações inferiores a 1,94, sendo o fator de correção apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Fator de correção h/d

Relação h/d	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,86
Nota: Valores intermediários podem ser obtidos por interpolação linear, com aproximação de centésimos.					

Fonte: ABNT NBR 5739 (2018)

Essa regularização pode ser realizada por retificação ou por capeamento. Na presente pesquisa foi realizada com retifica, utilizado um equipamento específico, capaz de remover uma camada do material de base, proporcionando uma superfície lisa e livre de ondulações e abaulamentos. No processo de capeamento, que não foi realizado para os corpos de prova em análise, os elementos são revestidos de uma fina camada de material que tenha

compatibilidade química com o concreto e proporcione um acabamento liso e plano após o endurecimento, entretanto, esse procedimento não é indicado para concretos de resistências mais elevadas, devido a concentração de tensões da superfície devido ao aprisionamento causado na base do corpo de prova.

Em conformidade com a NBR 5738 (ABNT, 2015b) os corpos de prova utilizados para a aceitação do concreto foram identificados e armazenados até o momento do ensaio em câmara úmida à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 95 %, sendo esse dispositivo regido pela NBR 9479 (ABNT, 2006). Em consonância a essa norma a eficiência da câmara úmida e do tanque de cura foi avaliada por meio de medições de temperatura e umidade relativa do ar, no mínimo, três vezes ao dia em intervalos de tempo regulares.

Em relação ao ensaio de resistência à compressão, para que esse seja realizado, os pratos e o corpo de prova foram limpos e secos. O corpo de prova foi posicionado no centro do prato inferior da prensa, com o auxílio de círculos concêntricos, presente no prato. O carregamento do ensaio foi aplicado continuamente e sem choques, com velocidade constante de $0,45 \text{ MPa/s} \pm 0,15 \text{ MPa/s}$, sendo cessado quando foi identificada queda na força, indicando a ruptura. Cabe destacar que a queda de força pode ocorrer mesmo quando não há fissura visíveis na superfície do corpo de prova, indicando que ele rompeu internamente.

Além das condições de ensaio e tratamento dos corpos de prova, observou-se a calibração dos equipamentos utilizados. A prensa utilizada no ensaio deve ser de classe 1 ou superior, alimentada por uma fonte estável de energia, proporcionando uma aplicação contínua da força e deve ser calibrada a cada 12 meses ou sempre sob suspeita de erros ou realização de manutenções e deslocamentos do equipamento, conforme observado no laboratório em análise. Outro equipamento utilizado é o paquímetro, que deve ter resolução melhor ou igual a 0,1 mm e deve ser calibrado a cada 24 meses, conforme constatado.

4.3. BANCO DE DADOS

O banco de dados foi, então, constituído por ensaios de resistência à compressão realizados pelo SENAI e de consistência realizados em campo, onde foram utilizados concretos usinados de classes de resistência característica C30 e C40 e de consistência de classe S100, S160 e S220, uma vez que essas classes são as mais empregadas no Distrito Federal, possibilitando uma maior obtenção de dados para a pesquisa. É importante salientar

que todos os dados coletados foram obtidos com autorização das empresas responsáveis pela aplicação do concreto em obra.

Os dados obtidos foram inseridos no *software* Excel, pois essa é uma plataforma que permite a inserção de dados e organização em forma de tabelas e gráficos, além de facilitar a realização dos cálculos de análises estatísticas. Foram coletados dados referentes a classe de resistência e de consistência do concreto, além dos valores obtidos nos ensaios de abatimento de tronco de cone e de resistência a compressão do corpo de prova.

4.4. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Com os resultados dos ensaios compilados em planilhas eletrônicas, realizou-se o tratamento de dados com dois pilares estatísticos principais, sendo eles: a estatística descritiva caracterizada pelo resumo e descrição de uma grande massa de dados em informações de interesse; a inferência estatística caracterizada pela extrapolação de uma certa quantidade limitada de dados obtidos. Com a organização inicial dos dados, foi realizada a eliminação de dados espúrios (*outliers*), que são aqueles que diferem drasticamente dos dados em análise. Após a retirada desses elementos, prosseguiu-se com as análises envolvendo parâmetros de posição, sendo elas a média e a mediana, e parâmetros de dispersão, com enfoque para o desvio-padrão das amostras. Além de uma análise da tendência comportamental dos dados de acordo com um modelo de variável discreta, sendo utilizada a distribuição normal.

Foram realizadas análises referentes a resistência do concreto C30 e C40 atingida aos 28 ± 3 dias, e posteriormente foram analisadas as resistências desenvolvidas por cada concreteira. Também foi realizada uma análise do desenvolvimento e ganho de resistência utilizando todas as idades dos concretos C30 e C40, em sequência também foi realizada a análise por cada concreteira. Por fim, realizou-se o cruzamento entre os valores das resistências e da consistência solicitadas, utilizando a idade de 28 ± 3 dias.

4.4.1. Outliers, Média e Mediana

Outliers são valores que se distinguem dos demais dados e que podem ser causados por alterações específicas no processo, não representando um comportamento padrão da amostra. Dessa forma, a sua utilização para a análise da amostra pode gerar imprecisões e inferências equivocadas sobre a população. O método de amplitude interquartil (IQR) foi utilizado para a identificação desses valores discrepantes. Nesse método são estabelecidos limites inferiores e superiores para os dados com base da diferença interquartil da amostra.

Foi realizada a divisão entre quartis da amostra, obtendo-se dois valores tais que 25% das observações estão abaixo do valor e 75% abaixo do outro, recebendo a denominação de primeiro e terceiro quartil, respectivamente. Com a determinação dos quartis, foi calculada a amplitude interquartil (IQR), Equação 4.1. Sendo realizada a determinação dos limites com base na média e o IQR, conforme apresentado na Equação 4.2 e Equação 4.3.

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad \text{Equação 4.1}$$

$$L_{sup} = \bar{x} + 1,5 * IQR \quad \text{Equação 4.2}$$

$$L_{inf} = \bar{x} - 1,5 * IQR \quad \text{Equação 4.3}$$

Sendo, Q1 e Q3 os valores de primeiro e terceiro quartil, respectivamente; \bar{x} é a média da amostra, Equação 4.4, e L_{sup} e L_{inf} os limites superiores e inferiores, respectivamente. Dessa forma, todos os valores que extrapolaram os limites estabelecidos forma considerados *outliers*, e foram desconsiderados nas análises seguintes, de forma a se evitar inferências equivocados sobre o comportamento da população.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{Equação 4.4}$$

A média e a mediana são classificadas como indicadores de posição. A média foi calculada de acordo com a Equação 4.4. Já a mediana é o valor que ocupa a posição central dos dados ordenados, também pode ser definida como o valor do segundo quartil, onde 50% dos valores em análise estão abaixo desse valor.

4.4.2. Desvio Padrão

Levando-se em consideração a importância do desvio padrão como indicador de dispersão e como instrumento de análise estatística do banco de dados formado, pode-se conceituá-lo conforme as proposições matemáticas a seguir:

Segundo Magalhães e Lima (2007), têm-se como um mecanismo de medida de dispersão a variância, que pode ser definida estatisticamente pela Equação 4.5.

$$var_{obs} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_{obs})^2 \quad \text{Equação 4.5}$$

Sendo,

n o tamanho da população

x_i um dado elemento da população considerada

\bar{x}_{obs} a média da população observada

var_{obs} a variância observada na população

Com o objetivo de manter na medida de dispersão a mesma unidade que se tem no conjunto de dados, define-se desvio padrão como descrito na Equação 4.6.

$$dp_{obs} = \sqrt{var_{obs}} \quad \text{Equação 4.6}$$

Sendo,

dp_{obs} o desvio padrão observado na população

Quando se trata de variáveis em um conjunto de dados, pode-se ter vários indicadores de medição de dispersão. Contudo, para variáveis aleatórias, a medida de dispersão mais comum é justamente a variância, sendo o termo aleatório referente ao fato de que a cada possível valor, atribui-se uma probabilidade de ocorrência.

Segundo Magalhães e Lima (2007), seja X uma variável aleatória com $P(X_i = x_i) = p_i, i = 1, 2, \dots, k$ e média μ . A variância de X é conceituada como o quadrado dos desvios relativos à média ponderados pelas respectivas probabilidades e definida estatisticamente pela Equação 4.7.

$$Var(X) = \sum_{i=1}^k (x_i - \mu)^2 \times p_i \quad \text{Equação 4.7}$$

De forma similar ao que foi definido para um conjunto de dados, têm-se o desvio padrão como a raiz quadrada da variância da variável aleatória discreta.

Pode-se ainda definir a variância como o valor esperado de uma nova variável aleatória, sendo essa o desvio do quadrado, como mostra a Equação 4.8.

$$Var(X) = E[(X - \mu)^2] \quad \text{Equação 4.8}$$

Sendo,

$Var(X)$ a variância de uma variável aleatório X

μ a média da variável aleatória X

E é a esperança do quadrado da diferença entre uma variável aleatória e sua média

Levando em consideração os diferentes modelos discretos, tais como Uniforme, Bernoulli, Binomial, Geométrica, Poisson, torna-se possível calcular o desvio padrão a partir dos itens de parametrização de cada um desses modelos.

Foi calculado o desvio padrão do concreto sob diferentes parâmetros com o objetivo de se verificar o seu comportamento sob diversas perspectivas. Foi realizada uma análise focada no comportamento geral do concreto de acordo com sua classe de resistência e posteriormente, realizada a análise do comportamento do indicador para cada fornecedor de concreto. Por fim, realizou-se o cruzamento de dados de resistência com a consistência do concreto.

Para se avaliar a qualidade do concreto usinado produzido no Distrito Federal, foi utilizado a Tabela 3.9, de acordo com o recomendado pelo ACI 214R-02 (2002) para o concreto de classe C30 e C40 para a idade de 28 ± 3 dias. Sendo possível classificar o controle da produção em excelente, muito bom, bom, baixo e muito baixo.

4.4.3. Distribuição Normal das resistências

Como a distribuição da resistência a compressão do concreto é tida como uma variável aleatória, sua densidade de distribuição para os concretos C30 e C40, para a idade de 28 ± 3 dias, foi calculada conforme apresentado na Equação 3.7. O que possibilita visualizar a relação entre o desvio-padrão calculado e a média de resistência à compressão, calculadas nas análises anteriores.

Também foi realizado o cálculo da probabilidade de ocorrência de um valor inferior ao solicitado em projeto, padronizando a variável X para o valor padrão Z, utilizando a Equação 3.8., além de utilizar a Tabela 3.10 para se obter a probabilidade da ocorrência. Dessa forma, foi possível verificar se os concretos C30 e C40 fornecidos pelas concreteiras estudadas e empregados no Distrito Federal atendem à resistência à compressão solicitada em projeto.

4.5. CONTROLE E ACEITAÇÃO DO CONCRETO

O controle e a aceitação do concreto foram realizados sobretudo sob dois indicadores, sendo eles a consistência medida indiretamente pelo ensaio do abatimento do tronco de cone

e parametrizada pela NBR 16889 (ABNT, 2020a) e a resistência à compressão do concreto parametrizada pela NBR 5739 (ABNT, 2018a).

Para a resistência à compressão, levando-se em consideração que em todas as concreteiras da presente pesquisa o modelo estatístico de controle tecnológico é o de amostragem total, então o valor de resistência à compressão do exemplar que representa o concreto da betonada em análise é a própria resistência característica estimada, conforme a Equação 3.2.

Classificou-se cada betonada como aprovada, caso a resistência à compressão do exemplar que a representa fosse igual ou maior que a resistência à compressão de projeto. Assim, calculou-se o percentual de aprovação de cada uma das empresas participantes da pesquisa, seguindo a Expressão 4.1.

$$\%_{APROVAÇÃO} = \frac{BETONADAS\ APROVADAS}{BETONADAS\ TOTAIS} \quad \text{Expressão 4.1}$$

Calculou-se a porcentagem e aprovação das concreteiras a partir da Expressão 4.1, sendo possível por meio dela tanto a identificação das empresas com o pior atendimento à resistência estipulada em projeto e contratada pelas construtoras, bem como o cruzamento com os indicadores de dispersão para uma análise mais completa de cada processo produtivo.

Já para a consistência medida indiretamente por meio do abatimento do tronco de cone é avaliada tendo como referencial o valor do abatimento e da tolerância requeridos pelas construtoras de acordo com cada especificidade. A Expressão 4.2 apresenta como o intervalo de aceitação é caracterizado a partir dos requerimentos das construtoras.

$$INTERVALO\ ACEITAÇÃO = ABATIMENTO\ REQUERIDO \pm TOLERÂNCIA \quad \text{Expressão 4.2}$$

Assim, cada caminhão betoneira foi classificado em conforme ou não conforme se seu abatimento medido se encontra dentro do intervalo de aceitação ou não. A porcentagem de aprovação foi calculada a partir da Expressão 4.1.

4.6. POSSÍVEIS CAUSAS DE INCONFORMIDADE

Tendo como referência o cenário percentual de aceitação do concreto usinado produzido no Distrito Federal em cada uma das concreteiras participantes da presente pesquisa, identificou-se as possíveis causas de inconformidade segundo os papéis e

responsabilidades de cada integrante do fluxo de aferição dos indicadores de consistência e resistência à compressão do material.

A Figura 4.2 ilustra de forma gráfica como as possíveis causas de inconformidade podem estar relacionadas aos fabricantes ou concreteiras, aos responsáveis pela moldagem dos corpos de prova em obra ou ainda ao laboratório responsável pelo rompimento dos corpos de prova.

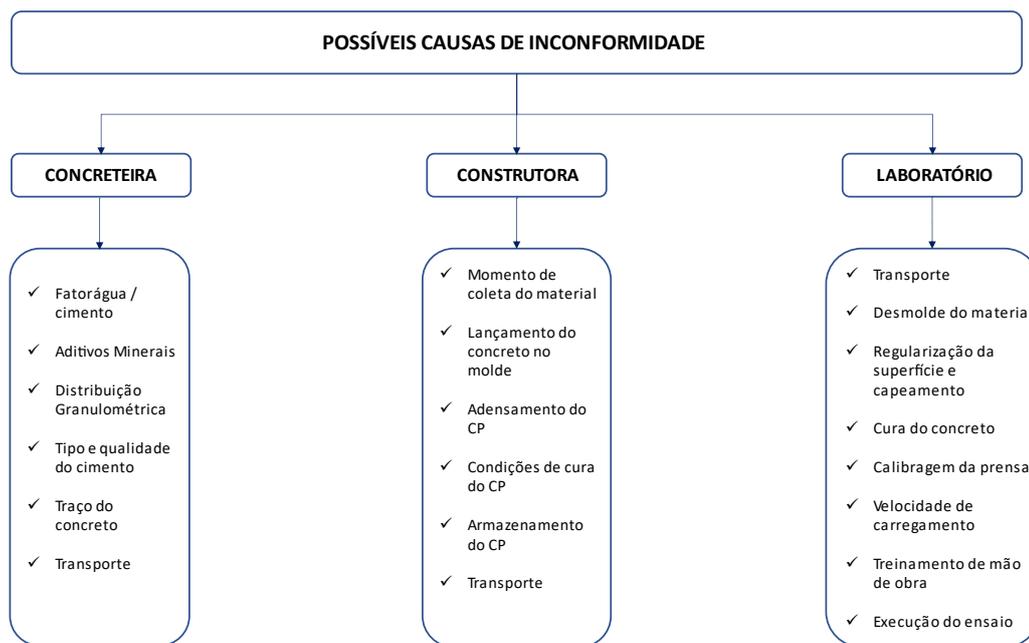


Figura 4.2 – Fluxo de responsabilidades de possíveis causas de inconformidade no concreto.

A concreteira possui responsabilidade nas possíveis causas de inconformidade do concreto na medida em que controla a relação água/cimento, diretamente relacionado à porosidade do material e conseqüentemente com sua resistência. Além disso, os demais componentes constituintes do concreto - como a qualidade do cimento utilizado - e suas respectivas proporções que constituem o traço do material podem resultar em inconformidade. Além de demais fatores, como um transporte inadequado que gere segregação ou uma distribuição granulométrica que contribua para uma maior quantidade de vazios no material, também influenciam.

Já a construtora é ao mesmo tempo a maior interessada no atingimento da resistência de compressão de projeto do concreto e aquela que possui a menor influência direta no resultado alcançado pela amostra. Sua influência se dá sobretudo na moldagem do corpo de prova na medida em que se faz necessário o lançamento correto do material nas formas, o

adensamento manual com as hastes de adensamento e ainda a cura adequada de acordo com o tempo de espera para coleta do corpo de prova.

Já o laboratório em que são realizados os ensaios de ruptura dos corpos de prova exerce grande influência sobre a aferição da resistência do material. Um capeamento que gere concentração de cargas e ruptura com menor resistência aferida, uma prensa não calibrada com frequência adequada ou ainda a aplicação de cargas com velocidade inadequada, pode impactar na resistência final medida para o corpo de prova, não sendo assim uma medida conforme as condições do concreto presente na obra.

A avaliação de possíveis causas de inconformidade foi feita para cada um dos responsáveis pelo fluxo de medição dos indicadores. Contudo, por falta de acesso a insumos quantitativos e qualitativos não foi possível garantir com embasamento técnico as principais causas de inconformidade, apenas sendo possível fazer o levantamento de sugestões de melhorias nos processos que foram acompanhados pelos autores da presente pesquisa.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Serão apresentadas as condições observadas em relação ao preparo e ao armazenamento dos corpos de prova nos canteiros participantes da pesquisa, além de abordar a execução do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova em laboratório. Em sequência, será realizada a análise do banco de dados formado a partir da contribuição das obras envolvidas com o projeto Indicadores do Concreto do Sinduscon-DF.

5.1. VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO

5.1.1. Ensaio de consistência

Foi realizado o acompanhamento de dois ensaios de consistência, *slump test*, nos canteiros 01 e 03, contudo, não foi possível realizar o acompanhamento no canteiro 02 por motivos logísticos. Em todos os canteiros, o mesmo funcionário realizava os ensaios de consistência, quanto a moldagem dos corpos de prova. Nos canteiros 01 e 03 esses procedimentos eram realizados por funcionários próprios das empresas, já no canteiro 02 esses procedimentos eram realizados por um funcionário do SENAI.

Nos canteiros acompanhados, a realização do ensaio seguiu as recomendações da NBR 16889 (ABNT, 2020a), sendo o ensaio realizado sobre uma placa metálica, com o molde preenchido com 03 camadas, com 25 golpes de adensamento por camada distribuídas por toda a seção. O ensaio ocorreu de forma interrompida e com duração total inferior a 10 minutos. Imediatamente após a retirada do molde foi realizada a medição do abatimento. A Figura 5.1 apresenta a realização do *slump test* nos canteiros.



(a)



(b)

Figura 5.1 – Realização do ensaio de consistência. Canteiro 01 (a) e canteiro 03 (b).

Os resultados obtidos com o ensaio de consistência pelo método do abatimento do tronco de cone estão apresentados na Figura 5.2. Sendo apresentado os resultados e as

solicitações feitas para a central, não foram realizados nenhum tratamento estatístico nos dados apresentados.

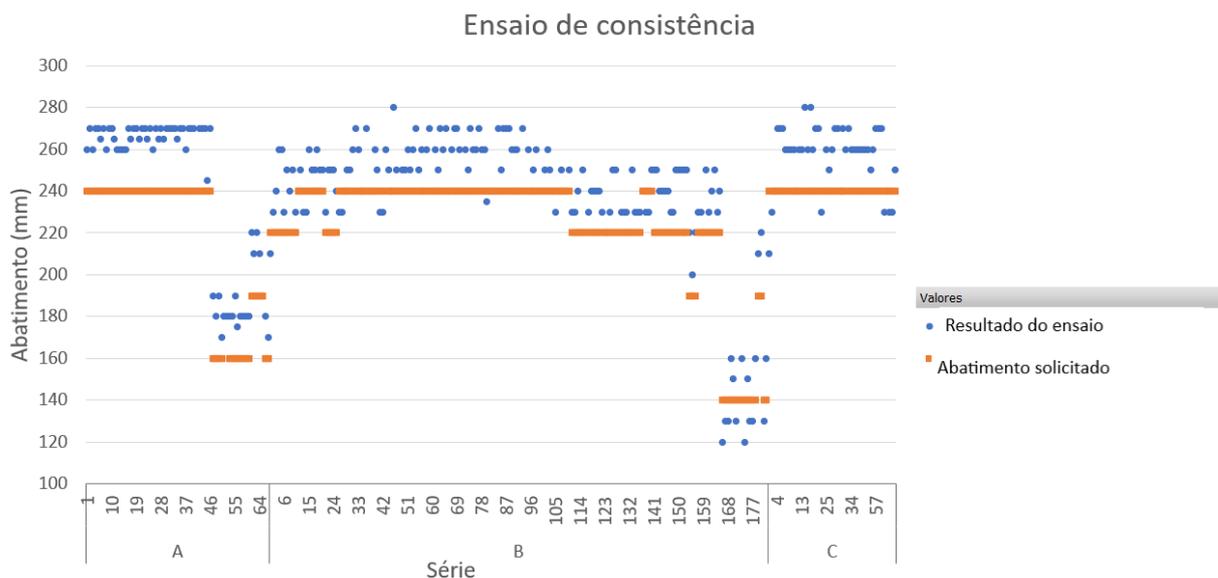


Figura 5.2 – Resultado dos ensaios de consistência

Por meio da Figura 5.2 é possível verificar a preferência por consistências da classe S220, devido à concentração dos dados para elementos de fundações. Sendo essa uma classe mais fluída o que gera uma menor ocorrência de problemas devido a entupimento dos mangotes e de funcionamento da bomba. Como, em geral são especificadas tolerância de 30 mm para o abatimento solicitado, é possível notar que, apesar de, em geral, serem entregues abatimentos superiores ao especificados, esses ficam dentro da margem de tolerância, com poucos resultados de inconformidade e sem a verificação da necessidade de ajuste de abatimento.

5.1.2. Moldagem e armazenamento dos Corpos de Prova

Foi realizado o acompanhamento da moldagem dos corpos de prova de duas betonadas em cada canteiro das empresas participantes da pesquisa. No total foram visitados três canteiros de obra, onde foi possível acompanhar o processo de recebimento do concreto, a realização do *slump test*, a moldagem e o armazenamento dos corpos de prova. Em dois canteiros o *slump test* e a moldagem dos corpos de prova eram realizados por funcionários da própria empresa e em um canteiro esses procedimentos eram realizados por um único profissional do SENAI que permaneceu fixo ao longo do tempo de acompanhamento da obra, o que já elimina uma das possíveis causas de variabilidade em resultados de resistência à compressão.

Os corpos de prova foram moldados em formas metálicas, fornecidas pelo SENAI, de dimensão básica de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura e adensados de forma manual utilizando hastes metálicas. O número de camadas foi definido de acordo com o abatimento obtido, conforme apresentado na Tabela 4.1. O número de golpes por camada foi definido de acordo com a dimensão básica do molde, conforme apresentado na Tabela 4.2. O processo de moldagem seguiu as recomendações na NBR 5.738 (ABNT, 2015b) e está apresentado na Figura 5.3 o momento da moldagem nos três canteiros acompanhados. Para se evitar a identificação das empresas as etiquetas foram apagadas das imagens.



Figura 5.3 – Moldagem dos corpos de prova. Canteiro 01 (a), canteiro 02 (b) e canteiro 03 (c).

Em todos os canteiros em que foi observado o controle tecnológico realizado, constatou-se moldagem de até quatro corpos de prova para aferição da resistência à compressão em laboratório. Essa prática se deve à moldagem de dois corpos de prova que

eram utilizados como contraprova caso fosse atestada não conformidade no indicador de resistência à compressão de qualquer uma das betonadas ensaiadas.

Em todos os canteiros os corpos de prova foram moldados próximos ao seu local de armazenamento, sendo utilizado para a moldagem o material do início do caminhão que chegava em obra, sendo um procedimento padrão observado. Em relação a esse procedimento, a NBR 16886 (ABNT, 2020b) recomenda que a moldagem seja realizada com material de descarga entre 15 % e 85 % do volume total da betona, entretanto, essa norma permite a retirada de material para a moldagem juntamente com o destinado para o ensaio no estado fresco, por questões logísticas.

Outro aspecto importante durante a moldagem é a determinação da quantidade de camadas para preenchimento do molde e o tipo de adensamento empregado. Para concretos com classes superiores a S50 a moldagem pode ser realizada de forma manual utilizando a haste metálica. As camadas são obtidas de acordo com o a dimensão básica do molde, podendo ser a metade especificada para concretos de classes superiores a S160. Durante as visitas realizadas, apenas o canteiro 03 recebeu concreto com abatimento superior a 160 mm, sendo realizada a redução da quantidade de camada durante a moldagem conforme especificado na norma. Cabe ressaltar que todos os ensaios utilizaram o adensamento manual com uso de haste metálica.

O local de moldagem era sempre protegido de intempéries e dedicado para esse fim, ainda que de maneira diferente em cada canteiro. Destaca-se que no canteiro 02 foi montada um ambiente forrado com uma camada de areia para amortizar os impactos mecânicos advindos do adensamento.

A cura inicial é realizada ao ar no mesmo ambiente em que foi realizada a moldagem e permanecia até que ocorra transporte do material para o laboratório. Esse transporte ocorre, em geral, em até 48 horas após a moldagem e os corpos de prova são transportados dentro das formas, conforme relatado pelos funcionários moldadores. Nos casos em que o transporte demora mais do que 48 horas, os funcionários moldadores relataram que os corpos de prova eram submersos em água saturada de cal, até que o responsável pelos ensaios chegasse para a coleta, porém por se tratar de uma situação adversa, pouco corriqueira, tal informação não foi verificada, sendo realizado apenas o reforço da necessidade de tal procedimento junto aos funcionários de canteiro. A Figura 5.4 apresenta os locais de armazenamento dos CPs.

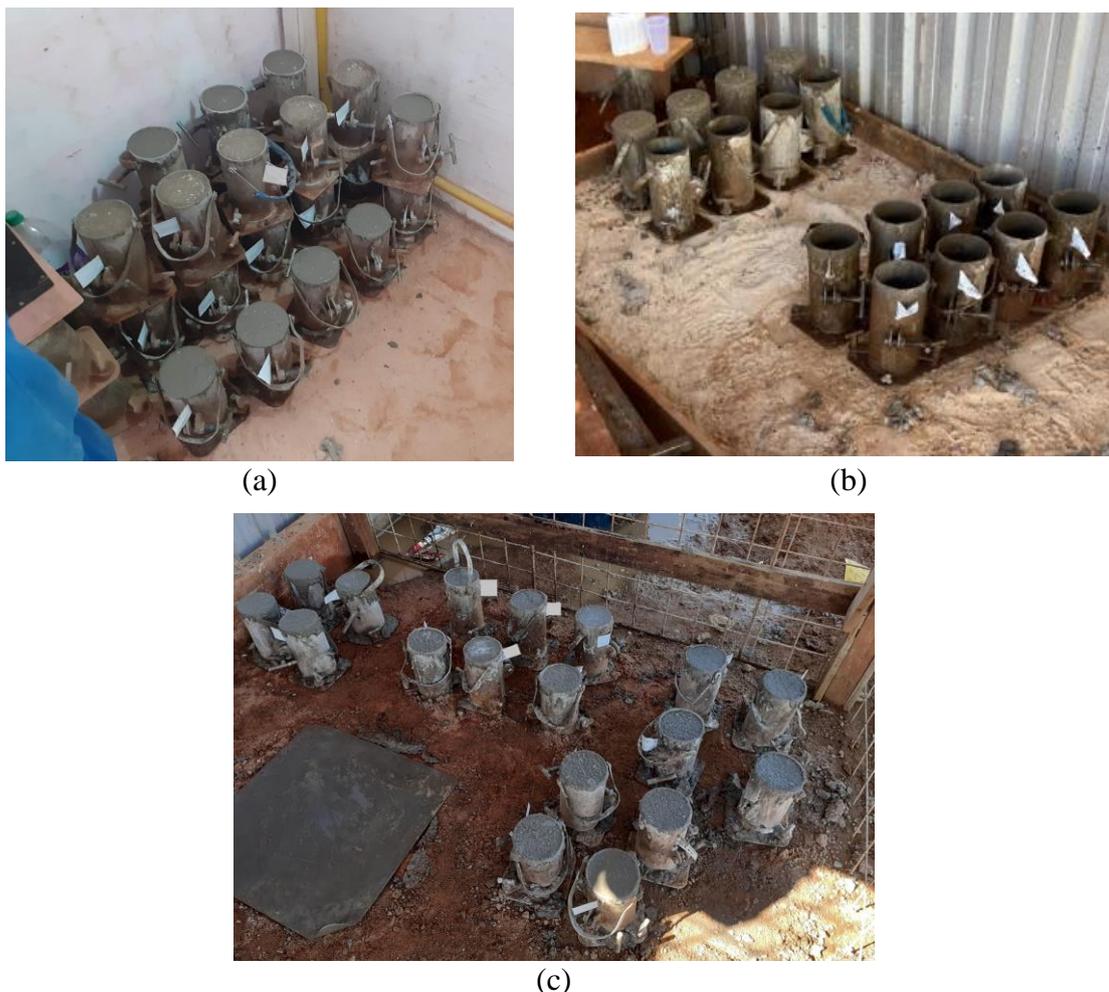


Figura 5.4 - Armazenamento. Canteiro 01 (a), canteiro 02 (b) e canteiro 03 (c).

Por meio da vistoria realizada nos canteiros de obra foi possível verificar que todos atendem a NBR 5.738 (ABNT, 2015b) em relação à moldagem e armazenamento dos corpos de prova, ainda que seja possível identificar a importância do cumprimento do horário previsto de concretagem, o que não foi obedecido pela empresa B durante o acompanhamento realizado, podendo gerar problemas técnicos no concreto usinado fornecido ao longo de seu transporte. Portanto, não foi necessária a realização de treinamento específico da mão de obra para a moldagem.

5.1.3. Ensaio de resistência à compressão

Durante a visita ao laboratório do SENAI foi possível verificar que o ensaio de resistência à compressão realizado no laboratório segue as recomendações normativas da NBR 5738 (ABNT, 2015b) e da NBR 5739 (ABNT, 2018a). Os procedimentos realizados no SENAI englobam: Transporte dos corpos de prova do canteiro para o laboratório,

desforma, identificação dos corpos de prova, regularização de superfície, cura e realização do ensaio de resistência à compressão.

O transporte dos corpos de prova do canteiro para o laboratório é realizado quando este está ainda em sua forma (metálica ou de plástico) e após o período de cura inicial. Ao chegar ao laboratório é realizada a desforma do material e a preparação da base utilizando o processo de retificação.

A regularização da superfície do corpo de prova, para a evitar a ocorrência de concentração de carga, é realizado na retifica, com a posterior limpeza dele. Não são utilizadas camadas de capeamento, como Neoprene ou enxofre. A aplicação dessas camadas pode gerar desvios na resistência aferida em ensaio de ruptura, pois altera a distribuição de tensão no corpo de prova, devendo ser evitada, quando possível. Contudo, é importante destacar que a retifica deve passar por um processo de frequente manutenção, evitando que o uso do instrumento interfira na medição final da resistência após determinado período de uso, o que não foi identificado no acompanhamento realizado junto ao laboratório.

Posterior a retifica, é realizada a identificação e a medição das dimensões básicas dos corpos de prova, sendo utilizado para isso paquímetros, regulados e calibrados a cada 24 meses, conforme solicitado pela NBR 5.739 (ABNT, 2018b). O diâmetro utilizado para o cálculo da tensão de compressão de ruptura é determinado pela média de dois diâmetros e a altura é obtida por meio de uma medida sobre o eixo longitudinal.

Após a identificação e medição das dimensões, os corpos de prova são submetidos à câmara úmida, regulada de acordo com a NBR 9.479 (ABNT, 2006), com aspensão de umidade para o ambiente. Segundo os funcionários do laboratório, são realizadas 03 medições diárias de temperatura e umidade na câmara, devendo essa sempre estar com umidade relativa do ar superior a 95 % e temperatura entre 23°C, conforme recomenda a NBR 9479 (ABNT, 2006).

Para a colocação do corpo de prova na prensa, é realizado a limpeza dos pratos, removendo pedaços de concretos presentes de ensaios anteriores, também é realizada uma leve limpeza da base do corpo de prova, evitando a presença de materiais que possam causar irregularidade na aplicação da força. O corpo de prova é posicionado na máquina de compressão no centro do prato inferior. Para que isso seja possível, os pratos da prensa possuem círculos concêntrico que auxiliam no posicionamento do corpo de prova de acordo com a sua dimensão básica. Recomenda-se que o laboratório utilize papel carbono na base

dos corpos de prova, pois durante a execução do ensaio, o papel ficará marcado nas regiões de contato entre a prensa e o corpo de prova, sendo possível realizar uma análise visual da área efetiva de contato de aplicação da carga.

É importante que se realize a identificação e a interpretação dos modos de ruptura após a realização do ensaio na prensa, o que não foi observado no acompanhamento realizado junto ao laboratório. O estudo dos modos de ruptura fornece um melhor entendimento do comportamento das variáveis que interferem na resistência final do corpo de prova, sendo este procedimento indicado para futuros trabalhos.

O ensaio foi realizado em uma máquina de compressão, com capacidade de 1000 kN, classe 0,5, calibrada anualmente. A aplicação da força do ensaio é realizada com velocidade constante e máxima de 0,60 MPa/s, conforme as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 2018a), que determina que a velocidade de carregamento do ensaio deve estar compreendida entre 0,30 MPa/s e 0,60 MPa/s. O ensaio pode ser interrompido automaticamente quando há queda na força, o que pode ocorrer devido à ruptura do corpo de prova ou então pelo surgimento de fissuras internas que caracterizem a resistência de ruptura, ainda que a superfície do corpo de prova não apresente fissura visíveis.

Com o acompanhamento completo dos processos desde a moldagem dos corpos de prova até o ensaio em laboratório foi possível verificar que os processos utilizados seguem suas respectivas normas técnicas aplicáveis. Portanto, pode-se admitir que os resultados que compõem o banco de dados são confiáveis, de acordo com as normas vigentes, uma vez que não foram detectadas inconformidades. Contudo, é importante destacar que a visita foi realizada ao longo de um único dia, sendo importante que o acompanhamento seja realizado por mais dias para a identificação ou não de possíveis desconformidades em trabalhos futuros.

5.2. BANCO DE DADOS

Foram coletados 1.106 dados relativos aos ensaios de compressão e consistência de três obras diferentes localizadas no Distrito Federal, com fornecimento de três concreteiras distintas. Cada concreteira recebeu uma codificação (A, B e C) para que as análises fossem direcionadas ao concreto usinado da região de forma geral, evitando qualquer exposição das empresas. A Tabela 5.1 indica o número de dados coletados por empresa participante.

Tabela 5.1 – Quantidade de dados.

Cód Concreteira	Nº dados
Concreteira A	272
Concreteira B	672
Concreteira C	162
Total	1.106

Foram obtidos 272 dados da concreteira A, 672 dados da B e 162 dados da C, totalizando os 1.106 dados. Cada obra acompanhada está associada a uma única concreteira, ou seja, até o momento da coleta dos dados, cada canteiro havia trabalhado com apenas um fornecedor.

Os dados coletados contemplam concretagens ocorridas entre setembro de 2021 e março de 2022. Assim, 10,7% das concretagens ocorreram no período de estiagem em Brasília, no mês de setembro, enquanto 89,3% ocorreram entre outubro de 2021 e março de 2022. Considerando as datas de realização dos ensaios de ruptura dos corpos de prova apresentadas nos relatórios disponibilizado pelas construtoras, têm-se a distribuição de dados ao longo do tempo de análise apresentada na Figura 5.5.

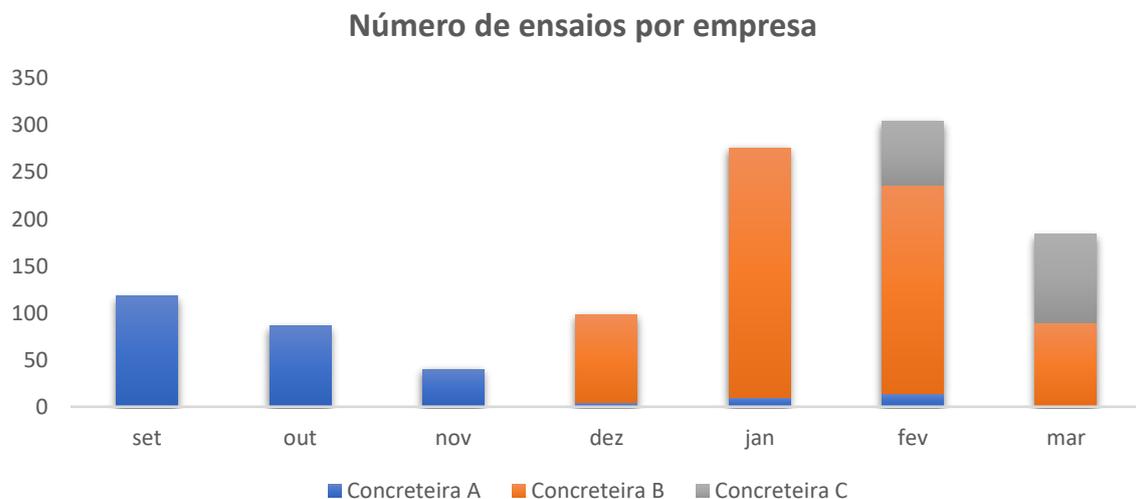


Figura 5.5 – Número de ensaios por empresa por mês

O ano de 2021 contempla 45,6% dos dados com uma forte concentração de dados da concreteira A, já os três primeiros meses de 2022 contemplam 54,4% dos dados com uma concentração de dados da empresa B em janeiro e um maior equilíbrio nos meses subsequentes.

Observou-se ainda que as construtoras analisadas optam, na maioria dos casos, por rompimentos nas idades de 7 e 28 dias. As duas idades representam 77,6% dos resultados,

sendo 38,7% para a idade de 7 dias e 38,9% para 28 dias. Os demais resultados, 22,4%, contemplam rompimentos de 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 18, 19, 27, 29, 30, 31 e 41 dias de idade.

Tendo em vista que todo o banco de dados é constituído por corpos de prova rompidos pelo SENAI, em todos os 1.106 casos o mecanismo de capeamento é o mesmo, com uso de retífica para regularização da superfície que receberá o carregamento para avaliação da resistência à compressão. Assim, não é possível fazer qualquer tipo de correlação estatística com a informação de capeamento e outras informações disponíveis.

Em relação ao formato dos corpos de prova, todas as empresas utilizaram moldes cilíndricos com 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. A NBR 5.738 (ABNT, 2015b) prevê tolerância de 1% para variações nas medidas diametrais e 2% para a altura. Identificou-se que 96,7% dos corpos de prova obtiveram variações iguais ou menores a 1%, enquanto 3,3% obtiveram variações diametrais entre 2 e 3%, sendo a maior parte relativa à concreteira B. Para as medições da altura, apenas 1 corpo de prova ultrapassou a tolerância prevista em norma, com 5% de variação em relação ao valor de referência, sendo este corpo pertencente à concreteira B também.

A NBR 5.739 (ABNT, 2018b) prevê que só devem ser ensaiados corpos de prova com relação altura/diâmetro menores ou iguais a 2,06. Para os casos em que a relação é menor que 1,94 é necessário aplicar um fator de correção na força máxima alcançada no ensaio, conforme apresentado no item 4.2.3 dessa pesquisa. Todos os dados obtidos possuem fator de forma inferior a 2,06 e apenas 1 apresentou relação inferior a 1,94 (também pertencente à empresa B), os demais possuem fator de forma entre 1,96 e 2,05.

De forma geral, as três obras acompanhadas estavam em etapas similares de desenvolvimento, realizando a concretagem de elementos de fundação, tais como cortinas atirantadas, estacas de contenção, muros de contenção, vigas de ancoragem e outros componentes de sistemas de fundação específicos de cada obra. A Tabela 5.2 apresenta os dados obtidos de acordo com cada elemento concretado.

Tabela 5.2 - Quantidade de dados por elemento concretado.

Local de Concretagem	Nº dados
CORTINA ATIRANTADA	52
ESTACA CONTENÇÃO	622
MURO DE CONTEÇÃO	356
VIGA DE ANCORAGEM	50
NÃO INFORMADO	26
Total Geral	1.106

Para esses elementos estruturais, a maioria das concretagens foram para concretos de classe C30, representando 92,5% dos dados coletados. A segunda classe de resistência mais utilizada foi a C40, com 4,5% do total, sendo fornecido apenas pela concreteira A. O concreto menos solicitado foi o de classe C25, representando apenas 2,7% do total, fornecido pela concreteira B, o qual não será utilizado nas análises seguintes por não possuir dados comparativos suficientes e nem valores de resistência acima de 7 dias, até o momento do final da coleta de dados.

Já no que se refere ao indicador de consistência do concreto em estado fresco, os dados são apresentados na Tabela 5.3 de acordo com o intervalo da classe de consistência em que o material foi solicitado.

Tabela 5.3 – Dados por consistência solicitada.

Classe de Consistência	Slump solicitado	Nº dados
S100	140	30
S160	160	56
	190	36
S220	220	238
	240	734
Não Informado		12
Total Geral		1.106

Os dados se concentraram na classe de consistência S220, ou seja, abatimentos maiores ou iguais a 220mm, representando 87,8% dos casos. A classe S160 representa 8,3% dos casos analisados, enquanto a classe S100 representa 2,7%, conforme apresenta a Tabela 5.3. A procura por abatimentos mais elevados reflete que os dados estavam mais relacionados a elementos de fundações como a estaca hélice contínua, que demanda uma rapidez maior de preenchimento do espaço pelo concreto usinado.

5.3. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

5.3.1. Outliers, Média e Mediana

Os *outliers* são os valores que se afastam drasticamente da série e levam a inconsistências nas análises estatísticas, esses foram identificados e retirados de acordo com cada análise a ser realizada nessa pesquisa. Destacam-se, principalmente, os obtidos para as análises de resistências alcançadas pelos concretos de classe C30 e C40 aos 28 ± 3 dias, onde foi realizada uma subdivisão do comportamento geral das amostras e do comportamento para cada concreteira. Outro destaque para os *outliers* foi observado no comportamento dos concretos incluindo todas as idades e subdivido de igual forma.

Na Figura 5.6 são apresentados os valores de resistência à compressão obtidos nos ensaios de todos os corpos de prova para a idade de 28 ± 3 dias. Empregando o método IQR, Equação 4.2, obteve-se um limite superior igual a 43,0 MPa, utilizando a Equação 4.3, obteve-se um limite inferior de 24,7 MPa e utilizando-se a Equação 4.4 obteve-se uma média igual a 33,9 MPa.

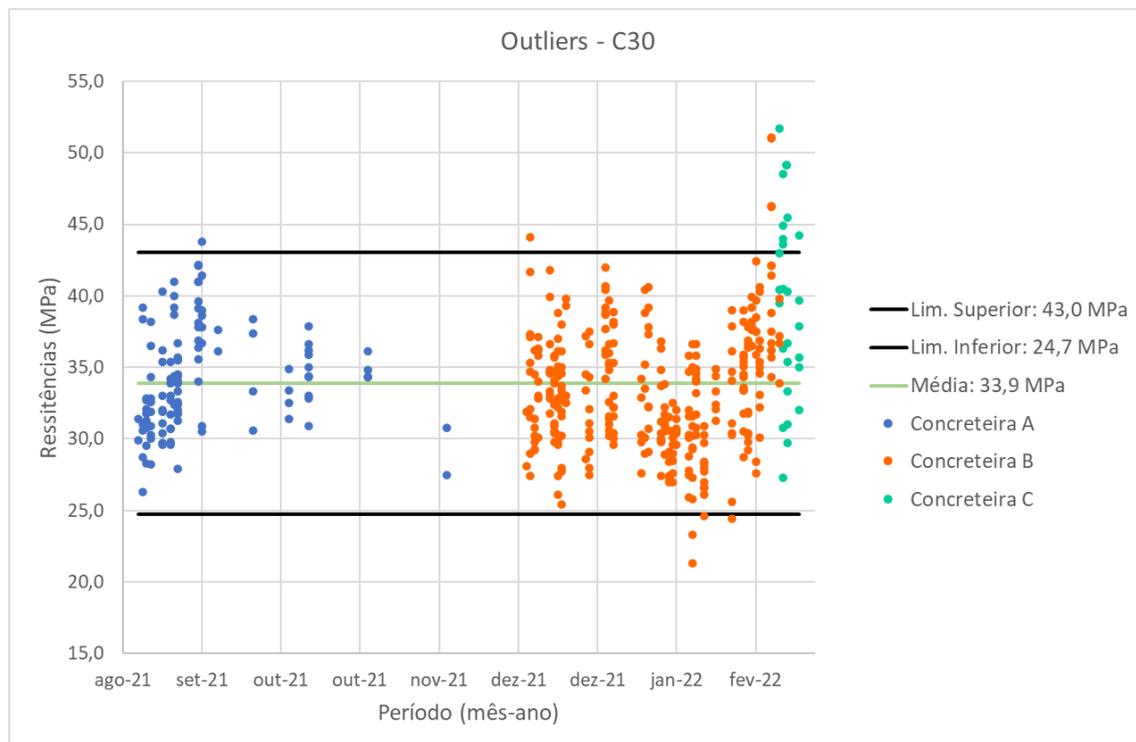


Figura 5.6 – Identificação de *outliers* para concretos C30, idade de 28 dias

Como pode-se observar na Figura 5.6, para os concretos C30 ensaiados com 28 ± 3 dias de idade, os resultados que mais se afastaram da série pertencem a concreteira C. O que pode ser explicado pelo fato desse fornecedor possuir menor quantidade de resultados,

apenas 5,7% do total, o que faz com tenha menor influência na definição da média e dos quartis do conjunto de dados. Entretanto, todos os dados descartados dessa empresa forneceram valores superiores aos apresentados das demais. Apenas a concreteira B possui valores descartados por estarem abaixo do limite inferior.

Os *outliers* encontrados para a análise de cada concreteira estão apresentados nas Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9.

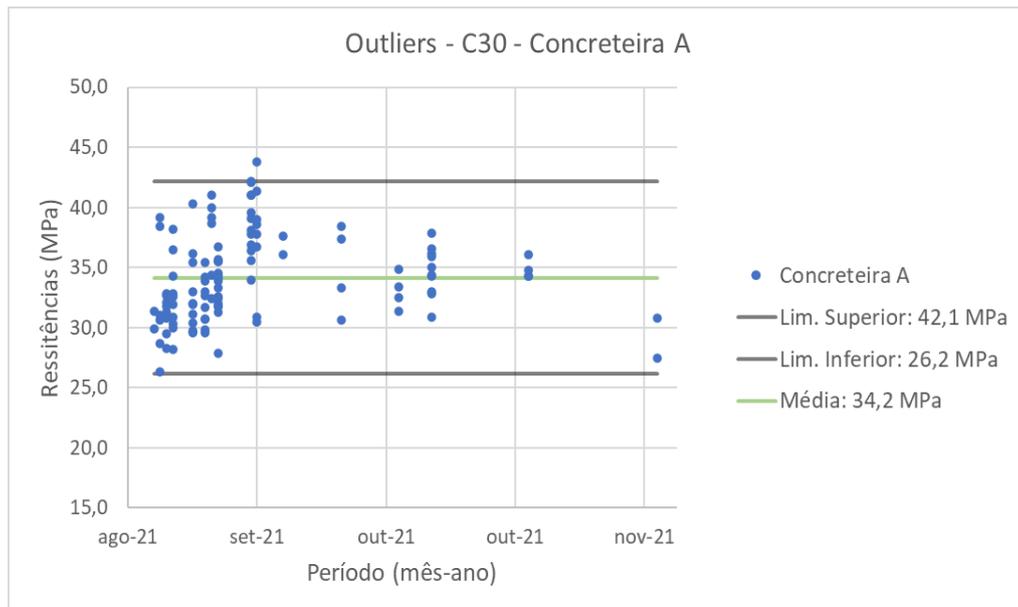


Figura 5.7 – Identificação de *outliers* para concretos C30, idade de 28 dias Concreteira A

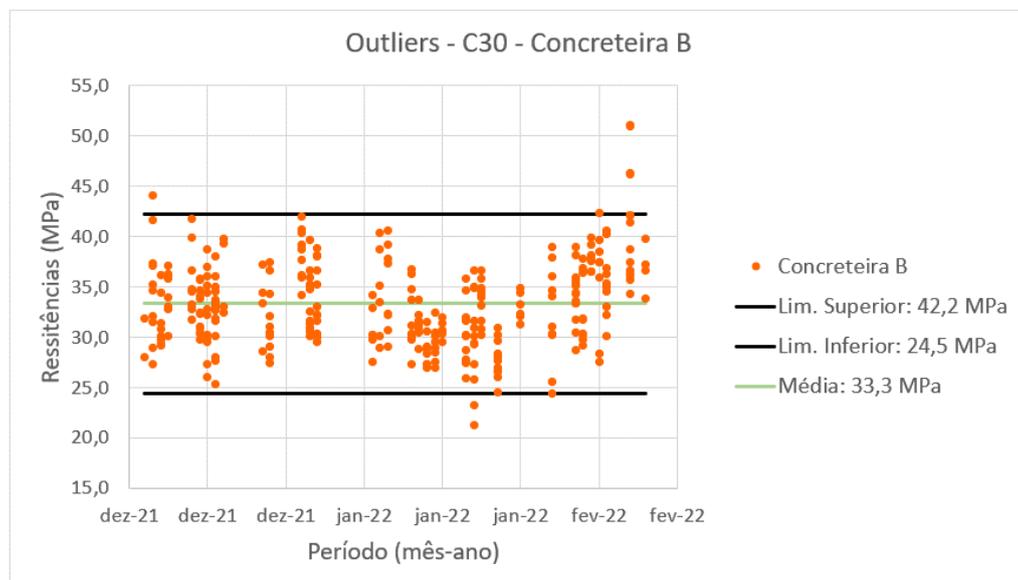


Figura 5.8 – Identificação de *outliers* para concretos C30, idade de 28 dias Concreteira B

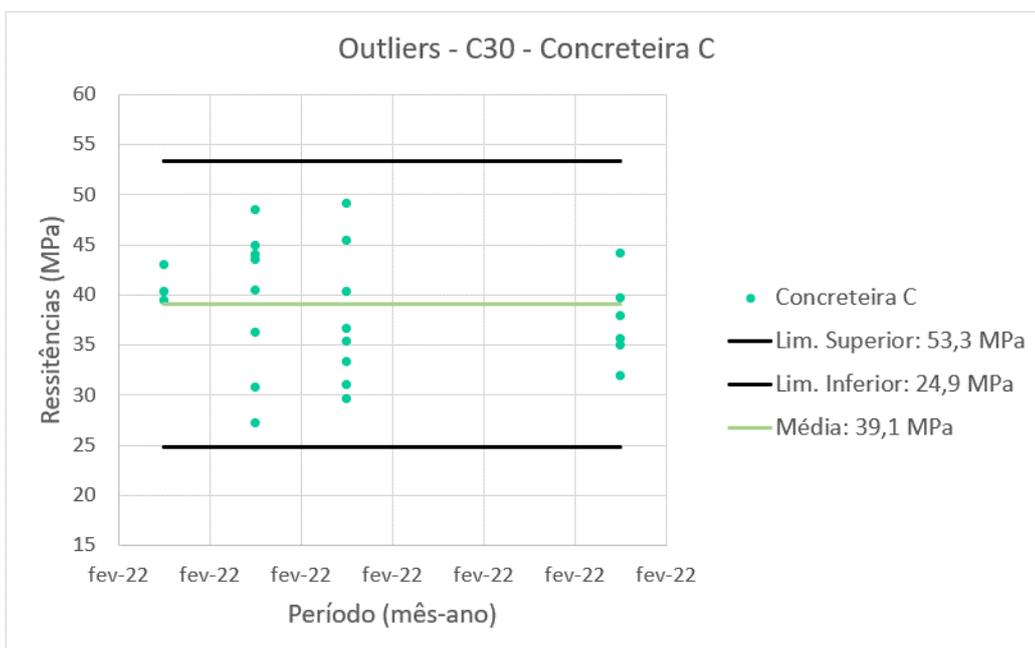


Figura 5.9 – Identificação de *outliers* para concretos C30, idade de 28 dias Concreteira C

Analisando os valores por concreteira tem-se que, dos 26 dados pertencentes a concreteira C, não foram constatados valores fora dos limites estabelecidos, entretanto é a empresa com a maior amplitude de variação de dados. A concreteira A apresentou menor amplitude e teve 2 valores descartados, dentre 114 coletados. Enquanto a concreteira B teve 3 valores descartados por estarem abaixo do limite inferior e 6 por estarem acima do limite superior, totalizando 9 dados descartados, entre os 316 coletados para essa idade.

O comportamento obtido para o ganho de resistência do concreto C30, considerando todas as idades coletadas, está apresentado na Figura 5.10.

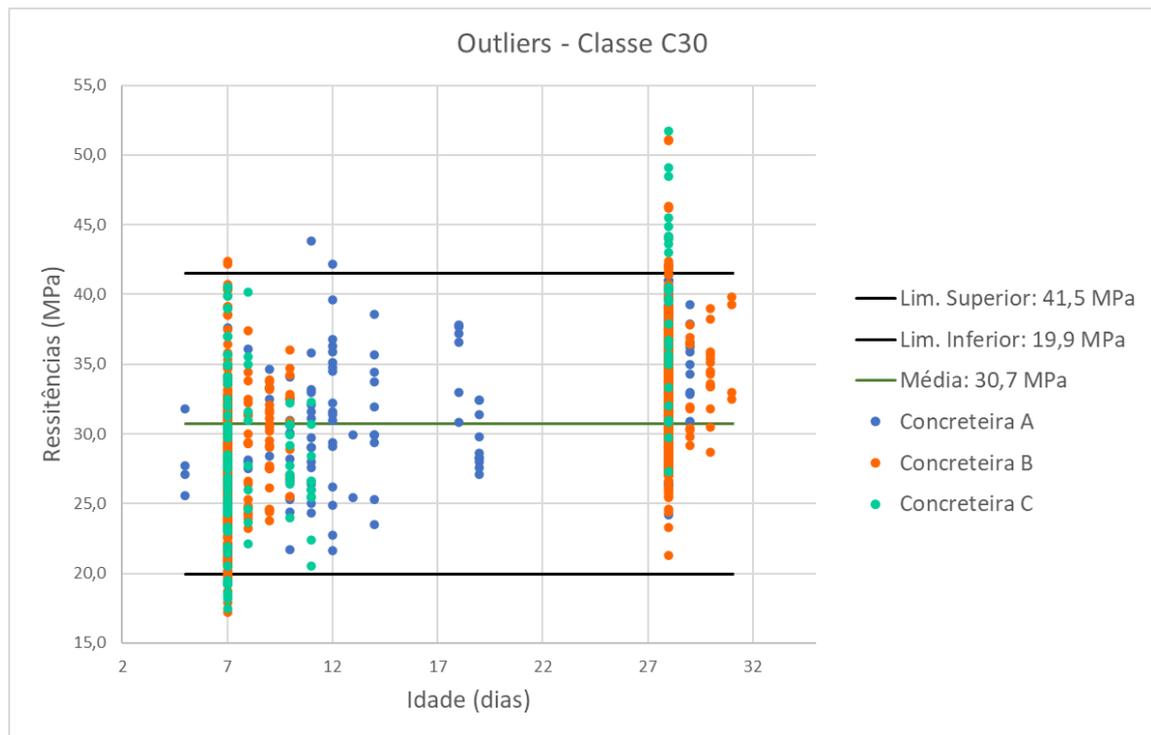


Figura 5.10 – Identificação de *outlier* para concretos C30, todas as idades.

Ao se analisar todos os dados de resistência sem separação por idades, Figura 5.10, observa-se o aumento da amplitude de variação de dados e uma pequena diminuição na média de resistência obtida, que passou de 33,9 MPa para 30,7 MPa. Também se observa que os dados descartados por estarem abaixo do limite inferior pertencem às idades iniciais do concreto, já os dados retirados por estarem acima do limite superior pertencem às idades mais avançadas. Um comportamento esperado, uma vez que o concreto deve apresentar um ganho significativo de resistência nas idades mais avançadas.

A distribuição dos ensaios realizados de acordo com a idade dos concretos para cada concreteira está apresentada na Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13.

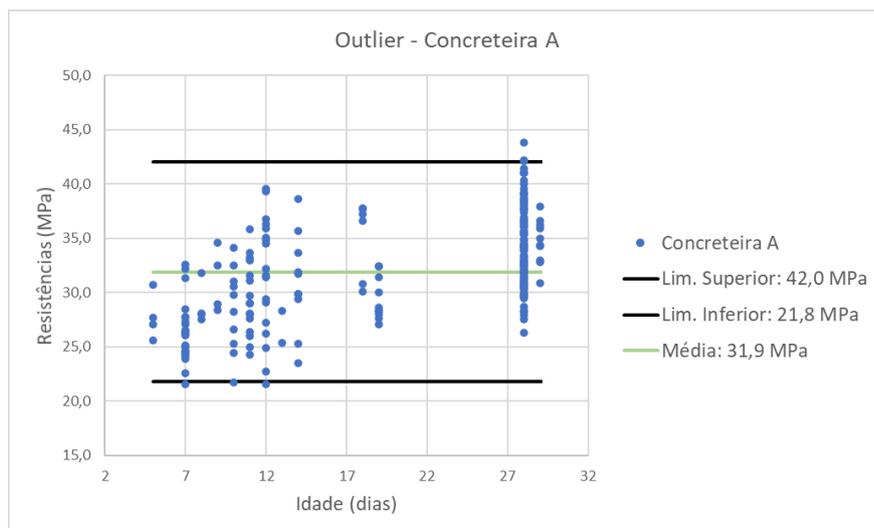


Figura 5.11 - Identificação de *outlier* para C30, todas as idades - Concreteira A

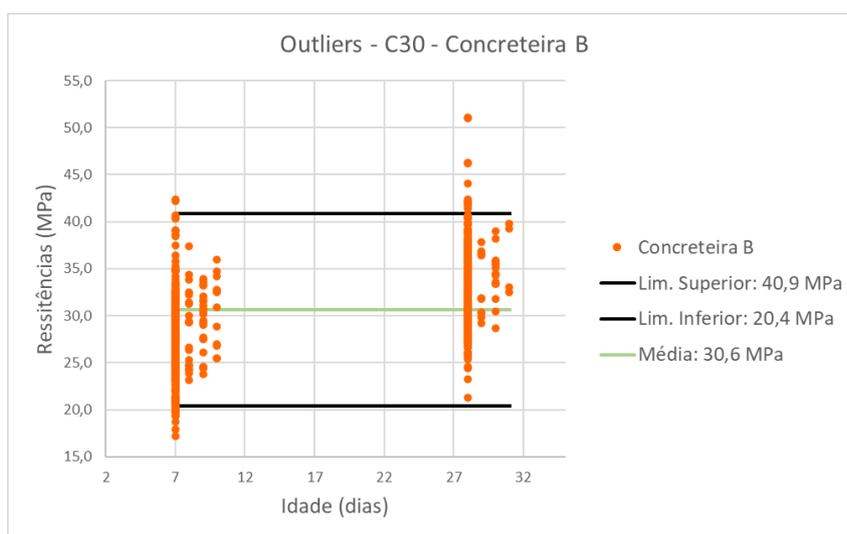


Figura 5.12 - Identificação de *outlier* para C30, todas as idades - Concreteira B

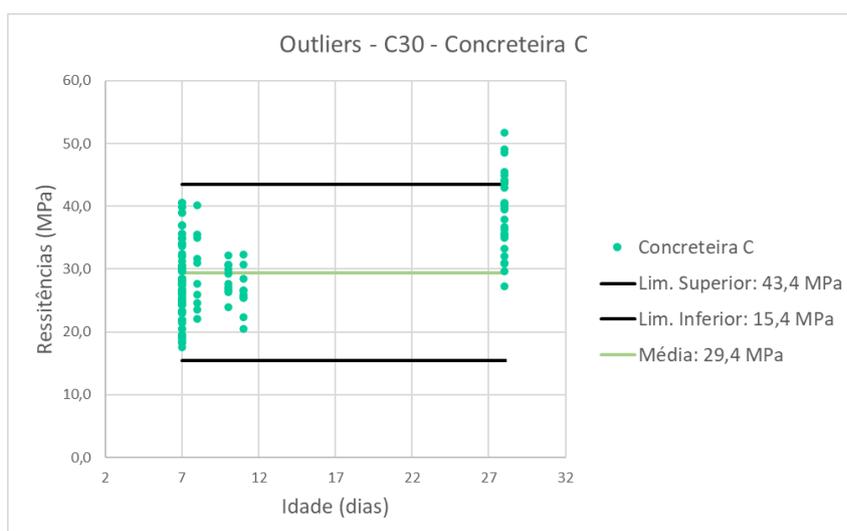


Figura 5.13 - Identificação de *outlier* para C30, todas as idades - Concreteira C

Para a Concreteira A, obteve-se dados de ensaio de idades mais variadas, já as Concreteiras B e C tiveram ensaios concentrados em 7 e 28 dias. As Concreteiras A e C mantiveram o ganho de resistência mais gradativo, apresentado menores resistências nos dias iniciais e maiores para idades mais avançadas. A distribuição da Concreteira B possui a menor diferenciação entre as idades iniciais e as idades avançadas, indicando o possível uso de cimentos mais finos e de maior resistência inicial.

As análises considerando as consistências solicitadas, englobam apenas o concreto C30, uma vez que o concreto C40 foi fornecido totalmente para a consistência S160, não sendo possível estabelecer relações com demais classes de consistência. As análises para o C30, para as consistências S160 e S220 foram realizadas para as idades de 28 ± 3 dias e estão apresentadas na Figura 5.14 e Figura 5.15.



Figura 5.14 – *Outlier* para concreto C30, consistência S160, idade de 28 dias.

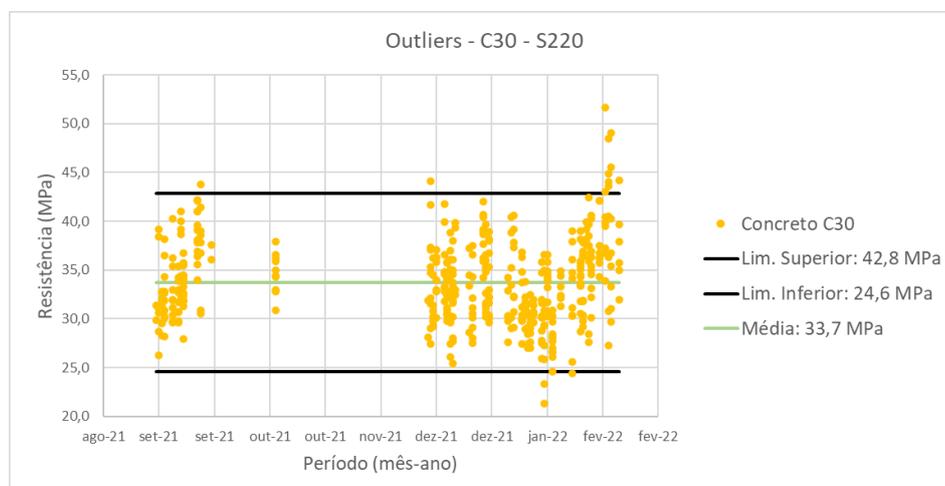


Figura 5.15 – *Outlier* para concreto C30, consistência S220, idade de 28 dias.

Como pode ser observado na Figura 5.14 e Figura 5.15, os pedidos do concreto C30 foram mais concentrados para a consistência S220, sendo obtidos 436 resultados na idade 28 ± 3 dias, enquanto que para o S160 foram obtidos 20 resultados para essa idade. As duas classes apresentaram valores que se afastam da série, sendo encontrado 1 valor para a classe S160 e 14 valores para a classe S220.

O concreto C40 foi fornecido exclusivamente pela Concreteira A, a Figura 5.16 e a Figura 5.17 apresentam a distribuição e a identificação dos *outliers* para as idades de 28 ± 3 dias e para todas as idades, respectivamente.

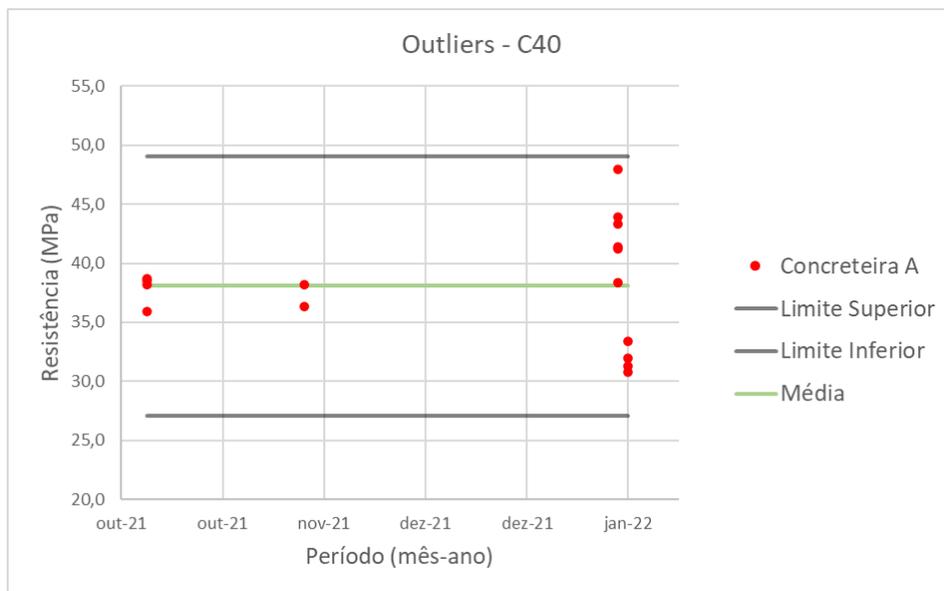


Figura 5.16 – Identificação de *outlier* para concretos C40, idade de 28 dias

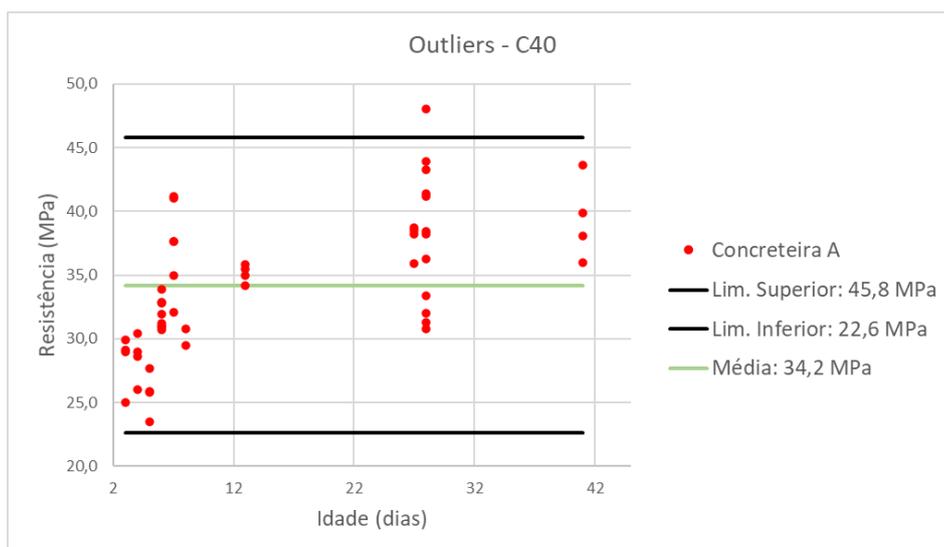


Figura 5.17 - Identificação de *outlier* para C40, todas as idades

Considerando a avaliação para 28 ± 3 dias, Figura 5.16, não houve *outliers* e a média obtida das amostras foi igual a 38,1 MPa, ou seja, mais da metade dos dados foram inferiores à resistência solicitada de projeto. Para a análise considerando todas as idades, Figura 5.17, foi obtido apenas 1 *outlier*, acima do limite superior, também foi possível observar que foi realizado o ganho gradual da resistência.

Após a retirada dos *outliers* calculou-se a média dos dados em análise. Como pode ser verificado na Tabela 5.4, algumas médias obtidas foram afetada com a retirada dos *outliers*.

Tabela 5.4 – Comparação das médias obtidas com e sem *outliers*.

Análise	Idade CPs	Média com <i>outlier</i> (MPa)	Média sem <i>outliers</i> (MPa)	Variação
C30	28 dias	33,9	33,6	1%
C40	28 dias	38,1	38,1	0%
C30 - Concreteira A	28 dias	34,2	34,1	0%
C30 - Concreteira B	28 dias	33,3	33,2	0%
C30 - Concreteira C	28 dias	39,1	39,1	0%
Slump S160 C30	28 dias	37,2	35,7	4%
Slump S220 C30	28 dias	33,7	33,5	1%
C30	Todas	30,7	30,6	0%
C40	Todas	34,2	33,9	1%
C30 - Concreteira A	Todas	31,9	31,9	0%
C30 - Concreteira B	Todas	30,6	30,5	0%
C30 - Concreteira C	Todas	29,4	28,5	3%

Com a retirada dos valores discrepantes, observou-se uma maior variação na média para os concretos C30 da concreteira C, considerando todas as idades do concreto, pois todos os valores descartados possuíam resistência acima do limite superior, como verificado na Figura 5.13, o que exerce influência na média, elevando-a. Outra alteração significativa na média ocorreu para os concretos C30 S160, a qual está relacionada com a menor quantidade de dados obtidos para essa condição, acarretando em uma maior variação da média com a retirada de valores.

Após a retirada dos *outliers*, se calculou a média e a mediana dos resultados, sendo apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Média e Mediana

Análise	Idade CPs	Média (MPa)	Mediana (MPa)	Variação	Quant. Dados
C30	28 dias	33,6	33,9	-1%	438
C40	28 dias	38,1	38,3	-1%	16
C30 - Concreteira A	28 dias	34,1	33,9	1%	113
C30 - Concreteira B	28 dias	33,2	32,9	1%	307
C30 - Concreteira C	28 dias	39,1	39,6	-1%	26
Slump S160 C30	28 dias	35,7	34,6	3%	18
Slump S220 C30	28 dias	33,5	33,1	1%	422
C30	Todas	30,6	30,5	0%	980
C40	Todas	33,9	33,4	2%	51
C30 - Concreteira A	Todas	31,9	31,8	0%	214
C30 - Concreteira B	Todas	30,5	30,4	0%	617
C30 - Concreteira C	Todas	28,5	27,7	3%	154

A relação entre a média e a mediana também explica o comportamento dos dados. Variações significativas da média em relação à mediana indica que essa está sendo influenciada por um grupo de valores do conjunto, o que pode ocorrer com mais frequência em grupos com menor quantidade de dados, uma vez que valores extremos terão mais influência sobre a média. Tal comportamento é observado na Tabela 5.5, onde as análises com menores quantidade de dados obtiveram maiores variações entre os parâmetros. A exceção se faz à análise do concreto C30 da concreteira C para todas as idades, pois se afastou da mediana, apesar de possuir volume de dados significativo, o que pode ser explicado por ter apresentado um aumento mais gradativo de sua resistência, ou seja, com valores mais significativos para a média aos 28 dias.

5.3.2. Desvio Padrão

A interpretação dos dados a partir dos indicadores de posição central como média e mediana auxiliam a entender de forma massiva o comportamento dos dados em comparação com a resistência à compressão de projeto, ou seja, se os dados estão próximos de um cenário de aceitação ou rejeição. Porém, além de indicadores de posição central, faz-se necessário compreender também os indicadores de dispersão dos dados coletados nas construtoras participantes do projeto. Os indicadores de dispersão são úteis para que se identifique o volume de dados afastados da posição central, a intensidade de afastamento desses dados do centro e ainda estabelece referência para as concreteiras usarem no processo de dosagem racional do material.

Para que se identifique visualmente o volume de dados afastados da posição central e a intensidade desses afastamentos foram elaborados gráficos de nuvem de pontos, conforme indicam a Figura 5.6 a Figura 5.17. Além disso, a elaboração de curvas de distribuição normal também indica visualmente a massa de dados afastada da posição central e da posição desejada referente à resistência à compressão de projeto.

A dispersão dos dados pode ser apresentada, também, pelo simples resultado do desvio padrão calculado, conforme apresentado na Tabela 5.6. Neste caso, a apresentação dos resultados foi feita entre as concreteiras participantes da pesquisa, entre as classes de resistência e entre as classes de consistência existentes no banco de dados. Cabe destacar ainda que os desvios presentes na Tabela 5.6 levam em consideração apenas os dados dentro do intervalo estipulado entre o limite inferior e superior dos gráficos de nuvem de pontos apresentada na análise dos *outliers*.

Tabela 5.6 – Desvio Padrão entre concreteiras, classes de resistência e classes de consistência em diferentes idades

Agrupamento analisado	Idade dos CPs	Média (MPa)	Mediana (MPa)	Desvio-padrão (MPa)
Classe C30	28 dias	33,6	33,9	3,8
Classe C40	28 dias	38,1	38,3	4,8
C30 - Concreteira A	28 dias	34,1	33,9	3,6
C30 - Concreteira B	28 dias	33,2	32,9	3,8
C30 - Concreteira C	28 dias	39,1	39,6	6,4
Slump S160 e Classe C30	28 dias	35,7	34,6	5,1
Slump S220 e Classe C30	28 dias	33,5	33,1	3,8
Classe C30	Todas	30,6	30,5	4,8
Classe C40	Todas	33,9	33,4	5,2
C30 - Concreteira A	Todas	31,9	31,8	4,3
C30 - Concreteira B	Todas	30,5	30,4	4,6
C30 - Concreteira C	Todas	28,5	27,7	5,9

A opção pelo cálculo do desvio padrão para agrupamentos de dados iguais, mas com idades dos corpos de prova diferentes se dá, sobretudo, pela quantidade de dados disponíveis da concreteira C. Como nessa última empresa, apenas 26 dos 162 dados coletados foram ensaiados para idade de 28 dias, então o indicador de desvio padrão se torna mais sensível mesmo com a retirada de *outliers*. Assim, compara-se o desvio padrão de todas as idades da empresa C com o mesmo desvio das empresas A e B.

Constata-se que quando levado em consideração apenas os dados de 28 dias de idade, o desvio padrão da empresa C é 77,5% maior que o desvio padrão da empresa A e 66,3% maior que o desvio padrão da empresa B. Quando se consideram os dados de todas as idades,

a diferença percentual do desvio padrão da empresa C para as demais cai, sendo 37,3% maior que o da empresa A e 29,1% maior que o da empresa B. Logo, o espaço amostral reduzido da empresa C de fato gera impacto na análise de desvio padrão, ainda que seja possível afirmar que a dispersão dos dados dessa concreteira é maior que as demais.

De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2022), tendo-se um concreto com desvio padrão conhecido e levando-se em consideração que ele foi elaborado com os mesmos materiais, com equipamentos similares e em condições equivalentes, então o valor do desvio deve ser fixado com no mínimo 20 resultados consecutivos em um intervalo de 30 dias, não podendo ser inferior ao valor de 2,0 MPa.

Dessa forma, o desvio padrão das empresas deveria estar entre 2,0 MPa e 4,0 MPa, tendo como referência o valor empregado para concreto com desvio padrão desconhecido. Utilizando a Tabela 5.6 pode-se notar que a concreteira A trabalha com desvio-padrão de 3,6, a concreteira B com 3,8 e a C com 6,4. Portanto, o caso da concreteira C é o mais desvantajoso, sobretudo no aspecto econômico. Isso se deve ao fato de a empresa necessitar produzir concretos com resistência de dosagem superiores para ter um material aceito em controle tecnológico, por não se ter um melhor domínio das variáveis do processo produtivo, indicado por seu alto desvio. A falha neste domínio pode estar associada a problemas na caracterização dos materiais, no estudo de dosagem do concreto e/ou no controle do processo produtivo.

Para as demais concreteiras, ensaios contendo todas as idades se faz necessário em condições específicas, como o acompanhamento da evolução de ganho de resistência com o tempo ou em casos em que o concreto precise ganhar determinada resistência até certa idade, como para aplicação de uma protensão. Para os casos de idades com 28 ou mais dias, a tendência é que a o desvio calculado para as empresas A e B seja menor, em função da quantidade de corpos de prova da empresa C. Os resultados a seguir são apresentados em função das classes de resistência, conforme apresentado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Desvio Padrão por classe de resistência

Agrupamento analisado	Idade dos CPs	Média (MPa)	Mediana (MPa)	Desvio-padrão (MPa)
Classe C30	28 dias	33,6	33,9	3,8
Classe C40	28 dias	38,1	38,3	4,8
C30 - Concreteira A	28 dias	34,1	33,9	3,6
C30 - Concreteira B	28 dias	33,2	32,9	3,8
C30 - Concreteira C	28 dias	39,1	39,6	6,4

Identifica-se uma diferença de 25,6% entre o desvio padrão calculado para os dados relativos à classe de resistência C40 em relação àqueles com classe de resistência C30. Ao se comparar a Tabela 5.7 com os níveis de controle apresentados pelo ACI 214 R-02 (2002), Tabela 3.9, é possível verificar que o concreto C30 do Distrito Federal, está classificado com um bom controle, uma vez que possui desvio-padrão entre 3,4 MPa e 4,1 MPa, assim como o material fornecido pelas concreteiras A e B, entretanto a concreteira C apresenta um controle muito baixo de produção, uma vez que possui desvio-padrão superior a 4,8 MPa. Em relação ao concreto C40, esse possui um baixo controle de produção, uma vez que está com desvio entre 4,1 e 4,8 MPa.

Com os dados analisados, constata-se um maior desvio padrão dos dados relativos a uma classe de resistência maior. Contudo, não é possível afirmar que essa correspondência é sempre verdadeira, devido ao fato de que apenas a concreteira A apresentou dados para essa classe de resistência e ainda assim em quantidades significativamente inferiores à classe C30, o que pode culminar em uma maior sensibilidade estatística dos dados.

Como a empresa A possui o menor desvio padrão entre as três concreteiras e tem em seu espaço amostral dados para resistência à compressão de projeto de 40 MPa - que possuem maior dispersão conforme supracitado - então seus dados para 30 MPa são os de menor dispersão entre todos os agrupamentos.

Levando-se em consideração as recomendações da NBR 12655 (ABNT, 2022), que estipula para concretos com desvio padrão conhecido que este indicador esteja em torno de 2,0 MPa, constata-se que a empresa A é aquela que possui, não apenas o desvio mais próximo do recomendado, mas também aquela que indica ter o melhor domínio sobre o processo produtivo em si. A produção de concreto com desvios grandes gera um maior impacto econômico nas concreteiras, tendo em vista que, por possuírem menor controle das variáveis que impactam na resistência final do material, acaba gastando mais para estarem em conformidade com o que é solicitado em projeto e com o que é estipulado em norma.

5.3.3. Distribuição Normal das resistências

Sabe-se que a resistência do concreto é dada por uma distribuição normal, onde é possível verificar a frequência de um resultado e calcular a probabilidade de obtenção deste. Assim, será realizada a análise das curvas normais obtidas para os concretos C30 e C40, obtidas para as idades de 28 ± 3 dias. A Figura 5.18 apresenta a distribuição normal obtida para o concreto C30.

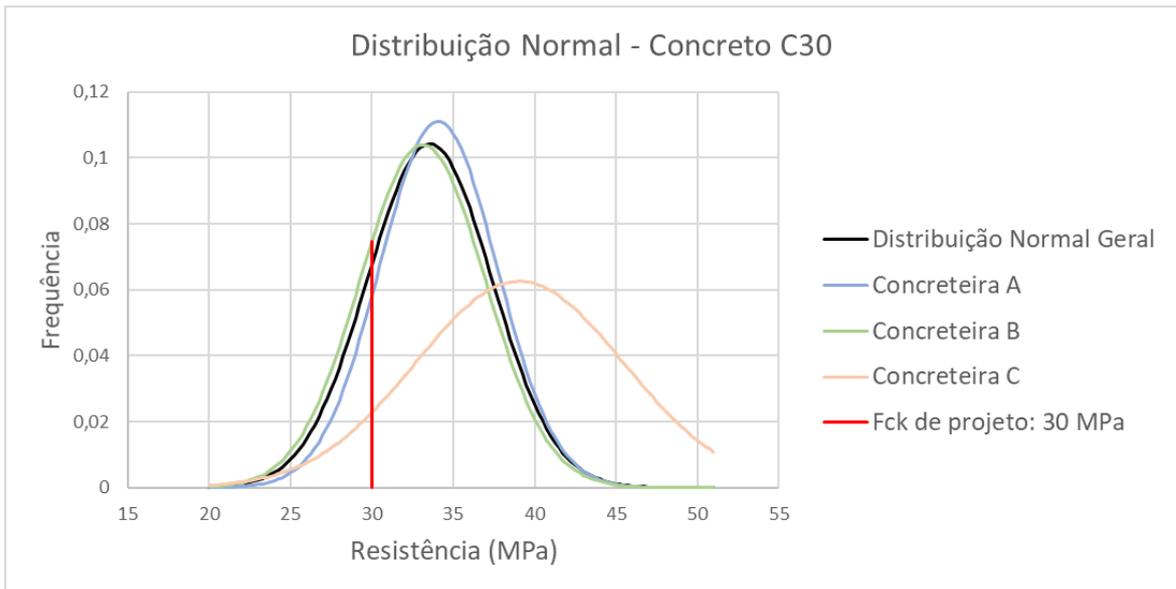


Figura 5.18 – Curva de Gauss para concreto C30

A quantidade de dados obtidos é primordial para a avaliação das curvas apresentadas na Figura 5.18. Como foram obtidos mais dados para as empresas A e B, 113 e 307, respectivamente, essas tiveram maior influência sobre a determinação da curva de distribuição geral. Já a empresa C obteve apenas 26 dados, portanto, tendo menor influência na forma da curva. Também é necessário destacar que a curva de Gauss é mais precisa à medida que se tem mais amostras, sendo considerada uma amostragem grande quando se obtêm mais de 35 dados. Dessa forma, a curva da Concreteira C pode sofrer modificações ao decorrer da obra, quando serão obtidos mais dados, tornando-a mais precisa.

Também é possível verificar que as Concreteiras A e B possuíram menor desvio-padrão, porém, como possuem menor média, suas curvas estão deslocadas para a esquerda, mais próximas do valor limite de 30 MPa. Enquanto a Concreteira C apresentou maior variação dos resultados, porém com média superior, afastando-se da resistência de 30 MPa.

Por meio da curva de Gauss foi possível calcular a probabilidade de ocorrência de valores inferiores a resistência característica. Para a curva geral de distribuição, há 17,62% de chance de se obter resistências inferiores à resistência característica de projeto. Considerando a distribuição de cada concreteira, a empresa B apresentou a maior probabilidade de ocorrência de valores inferiores, sendo igual a 20,61%. Enquanto a concreteira C apresentou menor probabilidade de ocorrência de valores inferiores, 7,64%. A expectativa de obtenção de valores inferiores na concreteira A é de 12,71%. Com essa análise foi possível verificar que nenhuma empresa conseguiu atender a resistência característica de

30 MPa, solicitada em projeto, uma vez que todas possuem probabilidade acima de 5% de não atingir o f_{ck} especificado.

Também é possível concluir que para uma obra há maior risco de rejeição do concreto por não atender a resistência de compressão especificada em projeto caso o seu fornecedor seja a empresa B. Esse risco diminui para o fornecimento da empresa A e o menor risco de rejeição está atrelado a empresa C. O que impacta diretamente na imagem e na confiança estabelecida entre clientes e fornecedora de concreto usinado. Sendo mais vantajoso para o cliente a adoção da concreteira C, mesmo que essa apresente menor controle de produção, refletido pelo alto desvio-padrão apresentado.

Também foi obtida a distribuição normal para o concreto de classe C40, apresentada na Figura 5.19. Vale ressaltar que a curva foi obtida com 16 resultados, sendo necessário a obtenção de, ao menos, mais 19 resultados para se obter uma curva mais precisa. O concreto C40 foi fornecido apenas pela concreteira A, não sendo possível realizar comparação com demais empresas.

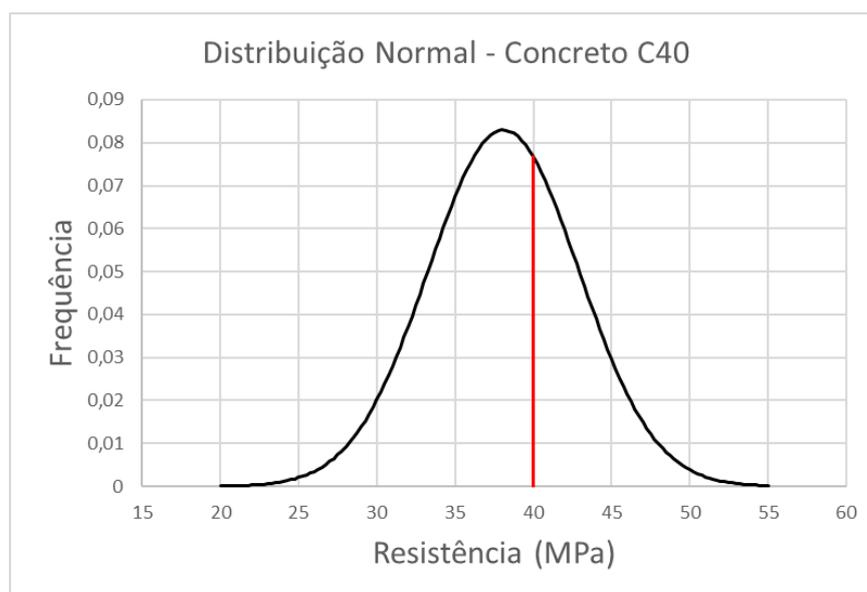


Figura 5.19 - Curva de Gauss para concreto C40.

Para esse concreto foi obtido uma probabilidade de 65,17% de ocorrência de concretos com a resistência inferior à especificada. Ou seja, é mais provável o fornecimento de concretos inferiores à resistência solicitada do que com desempenho igual ou superior. Dessa forma, fica evidente a necessidade da realização da capacitação do setor produtivo de concreto usinado para o atendimento dessa classe e superiores, uma vez que a demanda por concretos de classes mais resistentes é crescente.

5.4. CONTROLE E ACEITAÇÃO DO CONCRETO

5.4.1. Resistência à compressão

Para todas as obras acompanhadas, o modelo estatístico de avaliação da resistência à compressão do concreto foi o de amostragem total conforme relatado pelos responsáveis e verificado in loco. Ou seja, todos os caminhões betoneira que chegavam nos respectivos canteiros eram amostrados, sendo realizada também a rastreabilidade do lançamento do material no elemento estrutural em questão. Assim, a resistência à compressão do exemplar que representa o concreto da betonada é a própria resistência característica à compressão estimada do concreto, conforme indica a Equação 3.2.

É importante salientar também, que dos 1.106 dados que compõe o banco de dados, apenas 43,04% se referem a idades de 28 ou mais dias, ou seja, apenas esse percentual foi avaliado de acordo com os critérios de controle e aceitação do concreto. É necessário que o material sofra o processo de hidratação com a conseqüente formação de cristais que preencham os vazios existentes, para que assim a resistência mecânica seja desenvolvida e possa ser aferida em ensaio.

Os dados de cada caminhão betoneira são separados em séries, sendo cada série composta por um número par de corpos de prova definidos de acordo com a quantidade de ensaio de resistência que se deseje realizar, sendo utilizados dois corpos de prova por ensaio caracterizando a formação de um exemplar. A resistência à compressão do exemplar é definida, então, como a maior resistência medida experimentalmente entre os dois corpos de prova. Assim, caso a resistência do exemplar seja maior do que a resistência à compressão de projeto (f_{ck}), a série é aceita, caso contrário, ela é rejeitada.

A Figura 5.20 apresenta os resultados do número de séries totais e aprovadas entre as três concreteiras em análise, bem como a diferença percentual entre esses dois indicadores, ou seja, a porcentagem não aprovada em cada empresa.

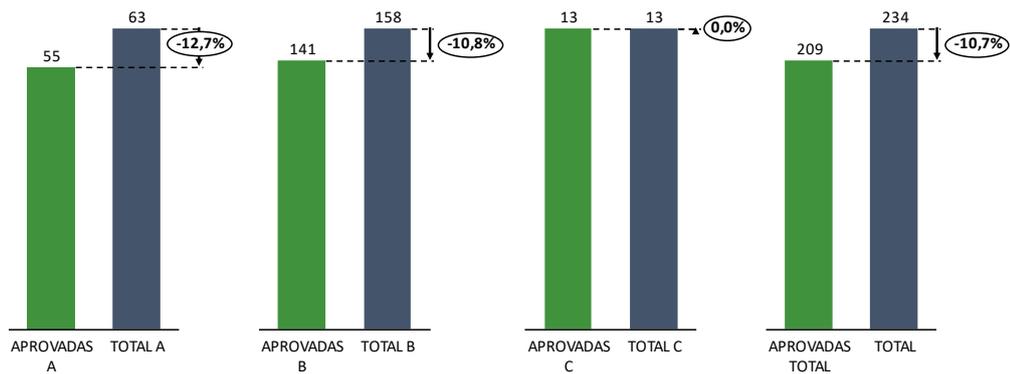


Figura 5.20 – Porcentagem de aprovação por concreteira.

Dentre todas as 63 séries componentes da concreteira A, 87,3% delas foram aprovadas, ou seja, o exemplar atingiu valor igual ou maior à resistência característica à compressão do concreto estipulada no projeto para o elemento estrutural a ser concretado. Já na concreteira B, das 158 séries componentes, 89,2% foram aprovadas. Por fim, na concreteira C, das 13 séries componentes, 100,0% foram aprovadas, ainda que se deva levar em consideração neste caso a baixa massa de dados coletada. No total do conjunto de dados, 89,3% das séries alcançaram algum corpo de prova ou ambos aprovados.

A aceitação dos lotes foi analisada também de acordo com as classes de resistência C30 e C40, conforme realizado para as demais análises.

A concreteira A é a única com dados para f_{ck} de projeto de 30 e 40 MPa. Para os dados relacionados à primeira classe de resistência, que constituem a maior parte do espaço amostral, identifica-se a aceitação de 51 séries dentre 53 existentes, resultando em um percentual de aceitação de 96,2%. Já para os dados relacionados à segunda classe de resistência, identifica-se um percentual de aprovação de apenas 40,0%, com apenas quatro de 10 séries aprovadas, compatível com a projeção realizada utilizando a curva de Gauss.

Pode-se inferir, também, que o percentual total, levando em consideração todas as concreteiras, de aceitação das séries relacionadas a um f_{ck} de projeto de 30 MPa é de 91,5%. Valor próximo aos 89,3% calculado para todas os dados de todas as concreteiras, tendo em vista que a maior parte deles está vinculado a este f_{ck} de 30MPa.

Como o controle tecnológico é fundamentado na avaliação de um exemplar, que tem como resistência o maior valor entre os dois corpos de prova que o constituem, então a porcentagem de rejeição é naturalmente menor do que a probabilidade de que se tenha um corpo de prova ensaiado com resistência menor do que a especificada em projeto.

5.4.2. Consistência

Os dados de consistência coletados de todas as três empresas participantes da presente pesquisa, foram plotados na Figura 5.21, que indica também os valores de referência de cada uma das classes de consistência - sendo elas S100, S160 e S220 - em estudo ao longo do período de coleta de dados compreendido entre setembro de 2021 e março de 2022.

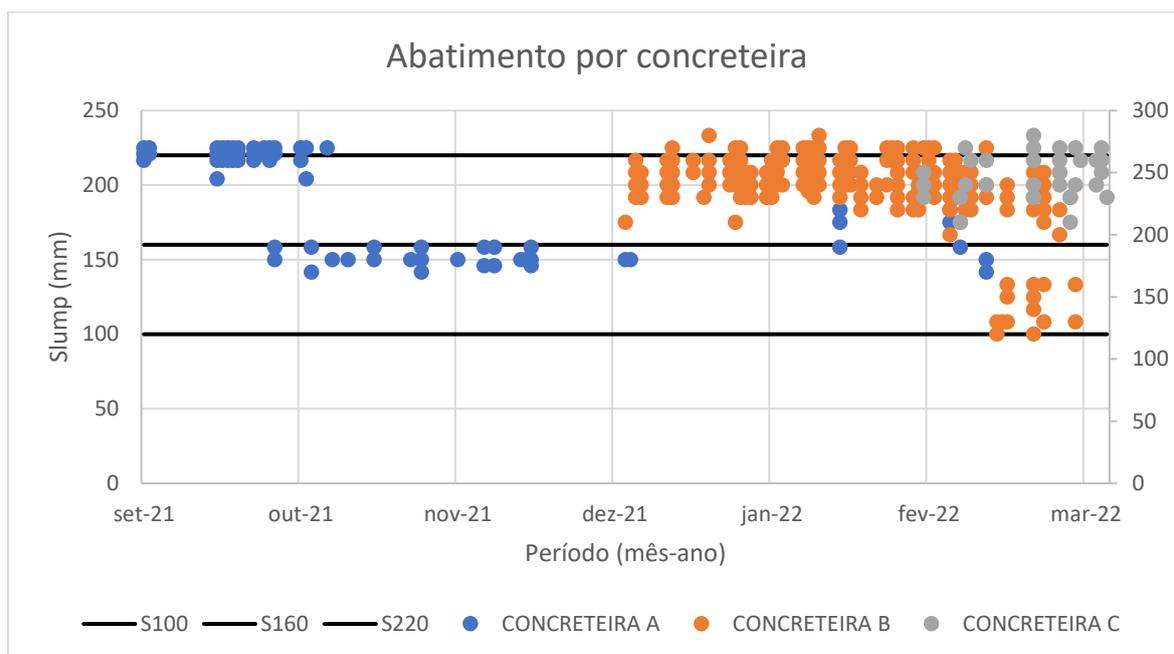


Figura 5.21 – Porcentagem de aprovação por concreteira

Os ensaios de consistência foram realizados antes da moldagem dos corpos de prova para ensaios de medição de resistência à compressão. A NBR 12655 (ABNT, 2022), que regula as condições de controle tecnológico do concreto e estabelece diretrizes para aceitação ou rejeição do material, respalda a rejeição de um lote caso a consistência medida não esteja no intervalo de aceitação.

O ensaio de abatimento é de simples realização e apresenta uma conformidade em relação ao abatimento solicitado em projeto muito maior do que a conformidade do indicador de resistência à compressão, como apresentado na Figura 5.22. Cabe destacar, também, que a consistência é medida por caminhão betoneira e não por corpo de prova

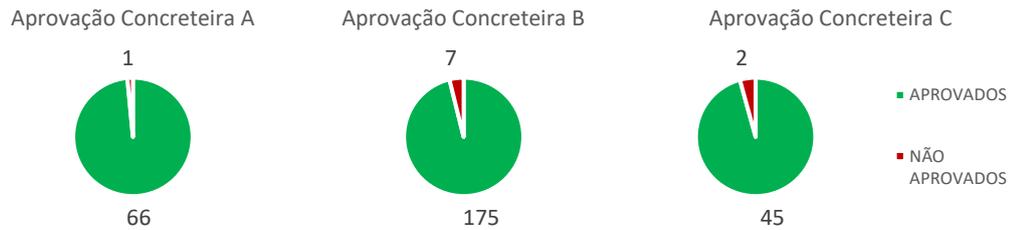


Figura 5.22 – Número de caminhões aprovados no indicador de consistência por concreteira

Constatou-se que 98,5% dos caminhões da concreteira A apresentaram conformidade de consistência em comparação com o valor solicitado, 96,2% dos caminhões da concreteira B apresentaram conformidade e 98,6% dos caminhões da concreteira C adquiriram a consistência desejada. No total, 97,4% dos caminhões apresentaram consistência no intervalo solicitada pelas construtoras.

5.4.3. Casos de inconformidade

Cabe destacar ainda que durante o acompanhamento do controle tecnológico das obras que participaram dessa pesquisa, em alguns dos casos em que foi identificada a não conformidade do indicador de resistência à compressão do concreto, foi realizada uma reavaliação do projeto estrutural, conforme a diretriz da NBR 7680 (ABNT, 2015c).

Para esses casos, não foram realizados ensaios não destrutivos, extração de testemunhos ou avaliação da segurança estrutural até o momento de acompanhamento das respectivas obras. É importante salientar, ainda, que os elementos estruturais em estudo são todos referentes à parte de fundações das obras, como estacas, muros de contenção, vigas de contenção e cortinas atirantadas.

5.5. POSSÍVEIS CAUSAS DE INCONFORMIDADE

As causas de inconformidade identificadas no controle tecnológico do concreto podem estar ligadas às diferentes partes constituintes do fluxo desse processo. Contudo, nessa pesquisa não foi possível realizar a verificação de possíveis inconformidades com todos os três responsáveis pela resistência à compressão final medida em laboratório, estando ausente o acompanhamento com a concreteira. Isso se deve a fatores como a indisponibilidade da relação quantitativa entre os materiais pelas concreteiras, ou seja, a informação do traço não é pública. Não se teve acesso, também, a ensaios como distribuição granulométrica dos agregados usados para produção do concreto de cada concreteira.

Já para as possíveis causas de inconformidade do concreto ligadas às responsabilidades das construtoras e do laboratório em questão, o acesso às informações foi maior e foi verificado que estão sendo seguidos as normas técnicas vigentes, podendo-se retirar as hipóteses referentes às moldagens e condicionamentos dos corpos de prova, bem como possíveis inconformidades do laboratório.

Assim, além de possíveis causas relacionadas às responsabilidades da concreteira, identificou-se que em todas as obras o material foi coletado no caminhão betoneira logo em seguida a sua chegada em obra. Contudo, destaca-se a importância de realizar a coleta entre 15 % e 85 % da descarga do caminhão, conforme recomendado pela NBR 16886 (ABNT, 2020b), tendo em vista que, devido o transporte, o material pode não estar completamente homogêneo em sua chegada e a amostra coletada pode ser impactada por essa condição.

Ainda relacionado às responsabilidades da construtora, identificou-se que cada construtora possuía especificidades no processo de moldagem dos corpos de prova. Assim, identificou-se na moldagem de algumas construtoras: a presença de camadas de areia para amortização do impacto de adensamento do concreto durante a moldagem; destinação de um funcionário fixo do SENAI para a moldagem nos dias de concretagem; uso de tanques com água para submergir os corpos de prova caso não fossem coletados pelo laboratório em 48 horas; condições de armazenamento diferenciadas em cada obra.

Já no que concerne às responsabilidades do laboratório de execução dos ensaios, identifica-se apenas um procedimento com margem para aprimoramento, tendo em vista que as prensas são calibradas com frequência anual, a equipe técnica recebe treinamentos regulares e são atualizados com as respectivas normas vigentes e que a câmara úmida atende todos os requisitos. Assim, sugere-se uso de uma folha de papel carbono no momento do ensaio para certificar que o carregamento está sendo aplicado em toda a área do corpo de prova, ainda que esse procedimento não seja obrigatório.

6. CONCLUSÃO

Pode-se dividir a conclusão do estudo de qualidade do concreto usinado produzido no Distrito Federal a partir do resultado e da análise dos dados coletados ao longo do período de estudo e ainda a partir de possíveis contribuições que possam ser incrementadas em trabalhos futuros, expandindo ainda mais a contribuição do projeto à sociedade e ao mercado de construção civil do Distrito Federal.

6.1. CONCLUSÕES

O objetivo geral do presente trabalho é o aprimoramento do cálculo da resistência de dosagem do concreto usinado produzido no Distrito Federal por meio da aferição do desvio padrão de diferentes concreteiras. O estudo envolve o projeto Indicadores do Concreto da Sinduscon-DF, construtoras participantes deste projeto que forneçam seus dados de controle tecnológico, o SENAI como responsável pelo rompimento dos corpos de prova e os autores da presente pesquisa como responsáveis pelo estudo estatístico dos dados.

Em relação a moldagem dos corpos de prova, destaca-se a importância de realizar a coleta entre 15 % e 85 % da descarga do caminhão, conforme recomendado pela NBR 16886 (ABNT, 2020b). Com exceção a essa recomendação, as demais orientações técnicas das normas foram respeitadas.

Em relação aos ensaios de resistência à compressão realizados pelo SENAI, também não foram identificadas irregularidades em relação às normas técnicas aplicáveis. Ainda que se tenha sugestões de melhorias dos processos, não é possível afirmar que nenhum deles causem inconformidade.

O uso de recursos gráficos como o gráfico de nuvem de pontos e a geração da curva de distribuição normal e o uso de recursos estatísticos como a identificação de *outliers* e o cálculo de indicadores de posição e de dispersão permitem conclusões importantes. A empresa C caracteriza-se como aquela com a maior porcentagem de aceitação, mas também como aquela com o maior desvio padrão calculado, indicando ser a empresa com o maior custo para produção do material e com o menor controle sobre as variáveis que influenciam no processo produtivo do concreto, apesar de ser a empresa que transmita a maior confiabilidade e aceitação de concreto para os clientes.

A concreteira B foi aquela que contribuiu com a maior massa de dados do banco formado, o que culmina em algumas observações. Além disso, apresenta melhor

porcentagem de aprovação do que a empresa A, mesmo com 1,47 vezes mais dados, ainda que seja a única empresa em que se tenha identificado corpos de prova sem conformidade em suas dimensões básicas e com maior probabilidade de rejeição de acordo com a curva de Gauss obtida.

A concreteira A apresentou-se como intermediária na maioria das análises estatísticas, em comparação com as empresas B e C. Entretanto, ao se realizar a análise de controle e aceitação do concreto essa foi a empresa que apresentou a maior porcentagem de concretos não aceitos por estarem abaixo da resistência à compressão solicitada em projeto.

Em termos gerais o concreto C30 produzido no Distrito Federal, apresenta desvio-padrão igual a 3,8, sendo classificado pelo ACI 214 R-02 (2002) como sendo um bom controle de produção. As empresas A e B também foram classificadas como possuindo um bom controle, sendo apenas a empresa C classificada como um controle muito baixo. Contudo, recomenda-se para todas as empresas um maior controle de produção a fim de se diminuir o valor da resistência média de dosagem.

Como consequência da qualidade do concreto produzido, tem-se uma rejeição de 10,7% dos concretos C30 utilizados no Distrito Federal, sendo necessário que as concreteiras melhorem o seu processo produtivo a fim de se diminuir a rejeição no controle de aceitação do concreto.

Ao se analisar os concretos C40 esses valores tornam-se críticos, uma vez que se obteve a aceitação de apenas 40% do concreto lançado com essa classe de resistência. Para essa classe foi classificada como possuindo um baixo controle de produção, utilizando a classificação do ACI 214 R-02 (2002). Constatou-se também um maior desvio padrão em grupos de classe de resistência maiores, ainda que a massa de casos para a classe C40 seja significativamente menor que para a classe C30 e que a classe C25, que não pode ser avaliada por falta de dados em idades iguais ou superiores a 28 dias. Recomenda-se assim a ampliação do banco de dados de classes de resistência diferentes para futuros trabalhos.

No que se refere à consistência, grande parte das obras do Distrito Federal trabalham com patamares mais elevados deste indicador, sobretudo para abatimentos de 220 e 240 mm, o que se justifica pelo fato de que os dados estão ligados a elementos de fundações, como a estaca hélice contínua que demanda uma maior rapidez de preenchimento do espaço pelo concreto usinado. Em relação ao controle tecnológico, este material fornecido pelas concreteiras apresenta performance elevada, com conformidade quase integral dos dados.

É possível, a partir do cálculo do desvio padrão de cada uma das concreteiras analisadas, aprimorar o cálculo da resistência de dosagem dessas empresas. É importante destacar que o cálculo da resistência do concreto com “j” dias de idade depende da resistência média e do desvio padrão, assim, contata-se que a verificação dessas duas propriedades são fundamentais para que se aumenta as probabilidades de aceitação do material usinado. A ampliação do banco de dados em trabalhos futuros pode contribuir de forma ainda mais significativa no cálculo de dosagem, aprimorando a relação de custo-benefício das concreteiras a partir de um maior controle das variáveis que influenciam no processo produtivo do concreto.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

Dentre os possíveis trabalhos envolvendo o projeto Indicadores do Concreto do Sinduscon-DF, a colaboração do SENAI e as análises estatísticas dos autores desta pesquisa, listam-se:

Criação de um modelo de treinamento para mão de obra: rastreamento de obras com menor investimento em controle tecnológico ou com falhas no controle realizado para instrução e renovação de profissionais responsáveis pela moldagem de corpos de prova;

Ampliação do banco de dados formado: coleta de uma massa de dados maior do que os 1.106 obtidos juntos às três empresas acompanhadas por essa pesquisa, permitindo um estudo estatístico mais robusto;

Observação do comportamento dos dados nos períodos de estiagem: ampliação da análise estatística para avaliação do comportamento da resistência à compressão nos períodos de estiagem em comparação com o banco de dados já existente;

Criação de relatórios de acompanhamento para as empresas participantes: criação de relatórios de acompanhamento de importantes indicadores de controle tecnológico e gestão da qualidade de produção a serem disponibilizados. Os relatórios devem ser de fácil atualização a partir da coleta de novos dados para as empresas participantes das análises com o objetivo de que possam ter uso com a periodicidade desejada;

Realização de visitas às concreteiras e verificação das variáveis de fabricação do concreto: visitas às principais concreteiras do Distrito Federal, com o objetivo de introduzir e avaliar variáveis relacionadas ao ambiente e modo produtivo que interfiram de alguma forma nos resultados de consistência e resistência do concreto em seu controle tecnológico;

Além de realizar ensaios para a comprovação da qualidade do cimento e agregados utilizados;

Introdução de novos indicadores de controle tecnológico: o controle tecnológico no Brasil se restringe em grande parte aos indicadores de resistência à compressão e de consistência. Assim, é possível que se fomente a realização de outros ensaios para ampliar a gestão da qualidade produtiva do concreto com ensaios de durabilidade, vida útil, reação álcali-agregado, expansão de sulfato, lixiviação e outros que elevem o nível de abordagem do controle tecnológico no Brasil;

Acompanhamento dos ensaios de resistência em outros laboratórios: ainda que tenha se identificada a conformidade dos processos realizados no laboratório do SENAI referentes ao ensaio de resistência à compressão, é importante que se realize este acompanhamento por mais dias e em outros laboratórios da região também.

Verificação do modo de ruptura do Corpo de Prova: Realizar o acompanhamento dos ensaios de resistência à compressão verificando o seu modo de ruptura, uma vez que esse pode indicar falhas no processo de moldagem e fragilidades no corpo de prova devido a utilização de retifica como forma de regularização da superfície. Sugerir aos laboratórios acompanhados a inclusão de imagens do corpo de prova rompido para que os engenheiros responsáveis pelas obras também possam realizar essa análise, sendo entregue um relatório mais completo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. **NBR 9479: Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro, 2006.

ABNT. **NBR 7584: Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2012a.

ABNT. **NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 um (n° 200).** Rio de Janeiro, 2012b.

ABNT. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014a.

ABNT. **NBR 12826: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico.** Rio de Janeiro, 2014b.

ABNT. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, 2015a.

ABNT. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015b.

ABNT. **NBR 7680: Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto.** Rio de Janeiro, 2015c.

ABNT. **NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação.** Rio de Janeiro, 2015d.

ABNT. **NBR 11582: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier.** Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018a.

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

ABNT. **NBR 16606: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro, 2018c.

ABNT. **NBR 16607: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2018d.

ABNT. **NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2019a.

ABNT. **NBR 9607: Prova de carga estática em estruturas de concreto - Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro, 2019b.

ABNT. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019c.

ABNT. **NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020a.

ABNT. **NBR 16886: Concreto - Amostragem de concreto fresco.** Rio de Janeiro, 2020b.

ABNT. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2022.

ACI. **214 R-02: Evaluation of Strength Test Results of Concrete.** Detroit, 2002.

ACI. **304 R-00: Guide for Measuring, Mixing, Transporting and Placing Concrete.** Detroit, 2009.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado: Segundo a NBR 6.118:2014.** 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2020.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto.** 1. ed. São Paulo: Pini; Brasília, DF: SENAI, 1993.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1ª edição ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1.

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. DE. **Noções de Probabilidade e Estatística.** 7. ed. São Paulo: Edusp, 2007.

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

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** 2. ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2013.