



UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DE PERNAMBUCO



JESUÍTAS BRASIL

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ROBERTO DE CASTRO AGUIAR

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS USADOS NA
REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE – CONFORMIDADE E
ANÁLISE ESTATÍSTICA

Recife, 10 de Abril de 2018

ROBERTO DE CASTRO AGUIAR

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS USADOS NA
REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE – CONFORMIDADE E
ANÁLISE ESTATÍSTICA

Dissertação apresentada à Universidade Católica de Pernambuco como requisito parcial, exigido pelo Programa de Pós- graduação em Engenharia Civil, para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração em Engenharia das Construções e na linha de pesquisa em Materiais de Construção Civil, orientada pelo Professor Doutor Romilde Almeida de Oliveira.

RECIFE

2018

TERMO DE APROVAÇÃO
ROBERTO DE CASTRO AGUIAR

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS USADOS NA
REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE – CONFORMIDADE E
ANÁLISE ESTATÍSTICA

Dissertação de Mestrado submetida ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, com ênfase em Materiais de Construção Civil.

Aprovada por:

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira
(Orientador – Engenharia Civil – UNICAP)

Prof. Dr. Ângelo Just da Costa e Silva
(Examinador Interno – Engenharia Civil - UNICAP)

Prof. Dr. José Afonso Pereira Vitório
(Examinador Externo – Engenharia Civil - UPE)

Prof. Dr. João Manuel de Freitas Mota
(Examinador Externo – Engenharia Civil - IFPE)

Recife, PE – Brasil

Abril, 2018

Dedicatória

*A Deus, as minhas avós Diamantina e
Leonor, ao meu avô Jarson e ao meu filho
Jarson Guilherme.*

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Família:

A Deus, porque tudo é do Pai! Tudo o que somos ou que julgamos termos conquistado nos foi dado por Deus, para que nós O reconheçêssemos e cumpríssemos a Sua vontade.

Ao meu pai Jefferson e a minha mãe Wellinette por todo amor, esforço e determinação em bem criar e educar a mim e aos meus irmãos.

Ao meu tio Luiz Carlos e as minhas tias Sônia e Maria Serlei, pelas presenças sempre constantes e atuantes.

A minha querida irmã Catarina e ao meu irmão e também meu orientador na especialização em Matemática, Prof. Dr. Eduardo de Castro Aguiar.

A minha amada esposa Deisy por toda paciência e energia desprendida em proporcionar-me as condições necessárias para realizar essa dissertação, além de ser a minha maior incentivadora nos momentos de dificuldades.

As minhas filhas Maria Vitória e Maria Helena, duas razões mais que suficientes para me fazerem buscar sempre algo mais e assim, colocar marcos na esperança que elas os sigam e os superem.

A Rory e a todos meus familiares e amigos que contribuíram comigo e que só eu sei a diferença que realizaram em minha vida.

As Instituições:

A Universidade Católica de Pernambuco, em nome do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, e ao antigo Colégio Nóbrega do Recife, as duas instituições de ensino da Companhia de Jesus que tive o privilégio e o orgulho de estudar dês da pré-escola até a pós-graduação.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade de Pernambuco, onde iniciei essa caminhada do mestrado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo

importantíssimo incentivo a capacitação e formação de novos docentes de nível superior, tão necessário durante todo o período do mestrado.

Aos diretores da Newhome Empreendimentos - PE, Eng. Murillo Moreira Martins, Eng. Fernando Henrique Affonso Ferreira de Amorim e Eng. Bruno Antônio Cavalcanti de Aguiar, e aos diretores da Construtora Brascon - PB, Econ. Trajano Ramalho Filho e Eng. Carina Ramalho, por todo estímulo e apoio que forneceram nesse meu desenvolvimento acadêmico.

As oito construtoras pesquisadas e seus respectivos representantes que confiaram a mim os resultados de compressão do concreto de suas obras e que, por motivos óbvios, preservem-lhes os nomes.

A Tecomat Engenharia, em nome do seu diretor Prof. Dr. Tibério Wanderley Correia de Oliveira Andrade, e de sua equipe técnica, Priscila Andreza, Thayse Vieira, Eng. Cassiana Amorim Sena, Eng. Jairo Colaço Mariz e Eng. José Maria da Cruz Neto, sem a qual não seria possível concluir eficientemente a pesquisa.

Aos Professores:

Ao Prof. Dr. Antônio Oscar Cavalcanti da Fonte, ex-Coordenador do Departamento de Engenharia Civil da Unicap, meu professor e orientador na graduação em Engenharia Civil, por toda ajuda prestada.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene, por pessoalmente me ter sugerido o objetivo geral dessa pesquisa.

Aos meus professores de Tecnologia do Concreto, Materiais de Construção e Microestrutura do Concreto, Prof. Dr. Arnaldo Cardim Carvalho Filho, Prof. Dr. Roberto Álvares de Andrade, Prof. Dr. José Orlando Vieira Filho e Profa. Dra. Maria da Graça Vasconcelos Ferreira, por todos os ensinamentos transmitidos.

Especialmente a três dos meus professores que conseguem extrapolar em muito as suas atribuições docentes e que sem o apoio dos quais, eu dificilmente teria a oportunidade de iniciar quanto mais de finalizar o meu mestrado:

Ao Prof. Dr. Ângelo Just da Costa e Silva, cuja admiração e convivência profissional se deram bem antes da acadêmica, tendo sido o principal mediador entre mim e as

construtoras pesquisadas e entre mim e o laboratório de ensaios de materiais provedor dos dados analisados.

A Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro, por quem tenho um respeito e um carinho todo especial, pois foi quem me acolheu como seu orientado no início do mestrado na Universidade de Pernambuco e quem me direcionou na construção das bases dessa dissertação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira quem primeiro me convidou a desenvolver um trabalho de iniciação científica, ainda em meados da década de 90. A quem tive a honra de ter como professor em seis diferentes disciplinas e que é para mim, para meus colegas de turma e para várias outras gerações de engenheiros, um modelo de professor e de engenheiro a ser seguido.

“Ad maiorem Dei gloriam”

Santo Inácio de Loyola

Roberto de Castro Aguiar. Resistência à compressão dos concretos usados na Região Metropolitana do Recife - Conformidade e Análise Estatística. Dissertação. UNICAP, Recife - PE, 2018, 120p.

RESUMO

A resistência à compressão é a mais importante e desejável propriedade de um concreto. Desta forma, problemas de não-conformidade nos valores das resistências à compressão se configuram em diminuição da qualidade do concreto, conseqüentemente na redução da sua durabilidade e vida útil, além de um risco à segurança estrutural. O objetivo geral dessa pesquisa é conhecer, através de dados quantitativos, o desempenho dos concretos utilizados nas obras de edifícios residenciais, comerciais e empresariais construídos na região metropolitana da cidade do Recife (RMR). Ademais, classificar individualmente as obras pelo conceito do Lote Global, ou seja, pelo percentual de não-conformidade de todos os seus concretos; comparar as conformidades entre concretos usinados e “in loco”; verificar a conformidade e a evolução anual dos concretos por classes de resistências; e apurar características próprias do uso do concreto pelas obras da RMR. Adotou-se como metodologia uma pesquisa de campo, onde as 8 principais construtoras da RMR autorizaram o fornecimento dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias de algumas de suas obras, através de um único laboratório de materiais credenciado à Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio (RBLE). Ao todo foram analisadas 235 obras completas, e tratados em planilha eletrônica 122.810 exemplares representativos, sendo 1.308 produzidos “in loco” e 121.502 produzidos por 9 concreteiras, das quais 8 delas com atuação nacional. Encontrou-se o percentual de não-conformidade total dos concretos em 20,21%, para concretos “in loco” em 37,84%, e para concretos usinados em 20,02%. Das 235 obras, apenas 6 (2,6%) obtiveram seus percentuais totais de resultados não-conforme menores ou iguais a 5%, conseqüentemente, 229 obras (97,4%) obtiveram percentuais totais de resultados não-conformes maiores a 5%, sendo que, dessas 229 obras, 110 (46,8%) obtiveram percentuais totais de resultados não-conforme maiores a 20%. Conclui-se que o descaso com a resistência de dosagem produz 1 lote não-conforme a cada 20 lotes avaliados, o que representa uma quantidade 400% maior do que a determinada pela NBR 6118/2014.

Palavras-chave: concreto, resistência à compressão, não-conformidade, análise estatística.

Roberto de Castro Aguiar. Compressive strength of concrete used in the Metropolitan Region of Recife - Conformity and Statistical Analysis. Dissertation. UNICAP, Recife-PE, 2018, 120p.

ABSTRACT

Compressive strength is the most important and desirable property of a concrete. In this way, problems of nonconformity in the values of the compressive strengths are configured in a reduction of the quality of the concrete, consequently in the reduction of its durability and useful life, besides a risk to the structural safety. The general objective of this research is to know, through quantitative data, the performance of concrete used in the construction of residential, commercial and business buildings built in the metropolitan region of the city of Recife (RMR). In addition, to classify individually the works by the concept of the Global Lot, that is to say, by the percentage of nonconformity of all its concretes; compare the compliances between machined concretes and "in loco"; verify the conformity and the annual evolution of the concretes by resistance classes; and to determine proper characteristics of the use of the concrete by the RMR works. A field research was used as methodology, where the 8 main RMR contractors authorized the supply of the results of resistance to compression at 28 days of some of their works, through a single laboratory of materials accredited to the Brazilian Network of Testing Laboratories (RBLE). A total of 235 complete works were analyzed, and 122,810 representative copies were processed in electronic spreadsheet, of which 1,308 were produced "locally" and 121,502 produced by 9 concrete plants, of which 8 were produced nationally. The percentage of total nonconformity of concretes was found in 20.21% for concrete in situ in 37.84% and for concretes machined in 20.02%. Of the 235 works, only 6 (2.6%) obtained their total percentage of non-conforming results of less than or equal to 5%, consequently, 229 works (97.4%) obtained total percentages of nonconforming results greater than 5% , of which, of these 229 works, 110 (46.8%) obtained total percentages of non-conforming results greater than 20%. It is concluded that the disregard with the dosing strength yields 1 nonconforming batch for every 20 batches evaluated, representing a quantity 400% greater than that determined by NBR 6118/2014.

Keywords: concrete, compressive strength, nonconformity, statistical analysis.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Objetivo Geral	19
1.2. Objetivos Específicos	19
1.3. Justificativa	19
1.4. Conteúdo do Trabalho	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1. O Concreto	21
2.1.1. <i>Principais Capacidades do Concreto</i>	22
2.1.2. <i>Componentes do Concreto</i>	23
2.1.3. <i>Microestrutura e Resistência Mecânica</i>	24
2.1.3.1. <i>Compostos do Cimento Anidro</i>	25
2.1.3.2. <i>Pasta de Cimento Hidratada</i>	26
2.1.3.3. <i>Relação Água/Cimento, Exsudação e Zona de Transição</i>	28
2.1.3.4. <i>Porosidade (Índice de Vazios e Grau de Hidratação)</i>	31
2.1.3.5. <i>Ligações Atômicas</i>	35
2.2. Conceitos Normativos e Estatísticos	36
2.2.1. <i>Lote, Amostra e Exemplar</i>	38
2.2.2. <i>Medidas de Tendência Central e Medidas de Dispersão</i>	38
2.2.3. <i>Distribuições de Probabilidades Contínuas</i>	42
2.2.4. <i>Resistência à Compressão do Concreto</i>	43
2.2.5. <i>Resistência Característica à compressão do Concreto</i>	45
2.2.6. <i>Grupos e Classes de Resistências</i>	47
2.2.7. <i>Resistência de Cálculo e Tensão Resistente de Cálculo</i>	49
2.2.8. <i>Tensão Resistente de Cálculo</i>	50
2.2.9. <i>Modalidade de Preparo do Concreto</i>	50
2.2.10. <i>Tipos de Controle do Concreto</i>	51
2.2.11. <i>Aceitação Final: Conformidade e Não-conformidade do Concreto</i>	55
2.3. Principais Fatores que Influenciam na Resistência à Compressão do Concreto	57
2.3.1. <i>Concreteira – Preparo, Mistura e Transporte do Concreto</i>	57
2.3.2. <i>Obra – Recebimento e Amostragem do Concreto e Moldagem dos CPs</i>	58
2.3.3. <i>Laboratório Tecnológico – Transporte, Cura e Rompimento dos CPs</i>	59
2.3.4. <i>Projetista de Estruturas – Aceitação ou Rejeição do Concreto Analisado</i>	60
3. METODOLOGIA	61
3.1. Escolha das Construtoras	61
3.2. Fonte da Coleta dos Dados (Laboratório Tecnológico)	63

3.3.	Planilha de Tratamento dos Dados	63
3.4.	Tipologia das Obras e Período de Abrangência da Pesquisa	65
3.5.	Delimitação Geográfica dos Dados (Região Metropolitana do Recife)	66
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1.	Visão Geral dos Dados Coletados.....	68
4.1.1.	<i>Distribuição das obras por ano.....</i>	<i>68</i>
4.1.2.	<i>Distribuição das obras por cidade da RMR e por RPA da cidade do Recife.....</i>	<i>69</i>
4.1.3.	<i>Distribuição dos exemplares por ano e classe de resistência.....</i>	<i>70</i>
4.2.	Conformidade Total das Obras	72
4.2.1.	<i>Conceito de lote global (LG)</i>	<i>72</i>
4.2.2.	<i>Classificação das obras pelo conceito de lote global</i>	<i>75</i>
4.3.	Conformidade Total do Concreto.....	77
4.3.1.	<i>Não-Conformidade Total do Concreto por Modalidade de Preparo</i>	<i>77</i>
4.3.2.	<i>Comparação entre a Resistência Estimada e a Tensão Resistente de Cálculo</i>	<i>79</i>
4.3.3.	<i>Não-Conformidades Anuais e mensais.....</i>	<i>80</i>
4.3.4.	<i>Não-Conformidade por Classe de Resistência</i>	<i>83</i>
4.4.	Parâmetros Estatísticos dos Concretos por Classe de Resistência	84
4.4.1.	<i>Média por Classe de Resistência</i>	<i>85</i>
4.4.2.	<i>Desvio-padrão por Classe de Resistência</i>	<i>85</i>
4.4.3.	<i>Resistência Característica Estimada por Classe de Resistência.....</i>	<i>87</i>
4.4.4.	<i>Coeficiente de Variação por Classe de Resistência.....</i>	<i>88</i>
4.4.5.	<i>Simulação via Métodos Monte Carlo das Classes de C10 a C65</i>	<i>89</i>
4.5.	Comparativo dos Resultados Encontrados com de Outros Trabalhos	93
4.5.1.	<i>Comparativo das Não-Conformidades por Classes de Resistência</i>	<i>94</i>
4.5.2.	<i>Comparativo das Não-Conformidades Totais dos Concretos.....</i>	<i>95</i>
4.5.3.	<i>Comparativo dos Parâmetros Estatísticos dos Concretos</i>	<i>97</i>
4.6.	Caracterização do Uso do Concreto nas Obras da RMR.....	98
4.6.1.	<i>Participação das Classes de Resistências na produção Anual de concreto</i>	<i>98</i>
4.6.2.	<i>Início das Obras por Mês.....</i>	<i>100</i>
4.6.3.	<i>Período de Uso do Concreto por Obra.....</i>	<i>101</i>
4.6.4.	<i>Percentual de Obra por Quantidade de Exemplar</i>	<i>102</i>
4.6.5.	<i>Percentual de Obra por Uso de Diferentes Resistências do Concreto</i>	<i>103</i>
4.6.6.	<i>Percentual de Obra com $f_{ck,est} < \sigma_{cd}$</i>	<i>104</i>
4.6.7.	<i>Modalidade de Preparo por Obra e por Construtora</i>	<i>104</i>
4.6.8.	<i>As Dez Maiores Resistência Encontradas por Modalidade de Preparo.....</i>	<i>105</i>
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	107

5.1. Conclusões	107
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	111
REFERÊNCIAS	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura microscópica da Etringita e processo de formação da Etringita.	27
Figura 2 - Estrutura microscópica do C-S-H e processo de formação do C-S-H.	28
Figura 3 - Esquema da exsudação visível e da exsudação interna.	29
Figura 4 - Esquema da Zona de Transição Pasta-Agragado.	30
Figura 5 - Relação Água/Cimento e Diâmetro dos Poros.	32
Figura 6 - Tempo de Hidratação e Grau de Hidratação.	33
Figura 7 - Relação Água/Cimento e Índices de Vazios.	34
Figura 8 - Resistência à Compressão e Relação Sólido/Espaço.	34
Figura 9 - Interações polares entre moléculas de HCl, Dipolo-Dipolo.	35
Figura 10 - Esquema de retidada de amostras de uma população.	37
Figura 11 - Esquema do Histograma e da Curva Normal.	43
Figura 12 - Distribuição normal por nível de significância bilareal e unilateral adaptado.	46
Figura 13 - Esquema da obtenção da Resistência Característica.	47
Figura 14 - Esquema do controle por amostragem parcial.	52
Figura 15 - Esquema do controle por amostragem total.	54
Figura 16 - Exemplo de Relatório de Controle Estatístico por Amostragem Total.	64
Figura 17 - Planilha de Tratamento dos Dados.	65
Figura 18 - Mapa das micro-regiões da RMR e da cidade do Recife.	66
Figura 19 - Quantidades de obras iniciadas por ano nas cidades da RMR.	69
Figura 20 - Quantidades de obras em construções por ano nas cidades da RMR.	69
Figura 21 - Localização das obras por cidade da RMR.	70
Figura 22 - Localização das obras por RPA da cidade do Recife.	70
Figura 23 - Quantidades de exemplares por ano.	71
Figura 24 - Quantidades de exemplares por classe de resistência.	72
Figura 25 - Esquema do processo de classificação da obra pelo conceito do Lote Global.	73

Figura 26 - Representação da Planilha Auxiliar de Classificação das Obras.....	75
Figura 27 - Percentual de não-conformidade por ano.	81
Figura 28 - Percentual de não-conformidade por mês.....	82
Figura 29 - Índice pluviométrico médio mensal da RMR.	82
Figura 30 - Percentual de não-conformidade por classe de resistência.	84
Figura 31 - Resistência média (f_{cm}) por classe de resistência.....	85
Figura 32 - Desvio-padrão (S_d) por classe de resistência.	86
Figura 33 - Resistência característica estimada ($f_{ck,est}$) por classe de resistência.	87
Figura 34 - Coeficiente de Variação (COV) por classe de resistência.	88
Figura 35 - Participação individual na produção anual das classes de resistência C30 a C50.	99
Figura 36 - Evolução anual da produção de concreto das classes de resistência C30 a C50.	100
Figura 37 - Percentual de obra por mês de início do uso do concreto.....	101
Figura 38 - Percentual de obra por período de uso do concreto.	102
Figura 39 - Percentual de obra por quantidade de exemplar utilizado.	103
Figura 40 - Percentual de obra por quantidade de diferentes resistências utilizadas.	104
Figura 41 - Percentual de obra com $f_{ck,est} < \sigma_{cd}$	104
Figura 42 - Percentual de obra por modalidade de preparo do concreto.....	105
Figura 43 - Percentual de construtora por modalidade de preparo do concreto.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Referências Normativas dos Componentes do Concreto.	24
Tabela 2 - Valores Populacionais Englobados pela variação do desvio-padrão.	41
Tabela 3 - Classificação da Amplitude do Coeficiente de Variação.	42
Tabela 4 - Fatores de Modificação da Resistência da Estrutura e da Resistência dos CPs.	45
Tabela 5 - Distribuição t de Student por nível de significância.....	45
Tabela 6 - Classes de resistência do Grupo I.....	48
Tabela 7 - Classes de resistência do Grupo II	48
Tabela 8 - Valores máximos para formação de lotes de concreto.	52
Tabela 9 - Valores de Ψ_6	53
Tabela 10 - Critério de julgamento do concreto e condição para aceitação.	56
Tabela 11 - Composição das micro-regiões da RMR e da cidade do Recife.	67
Tabela 12 - Nível de conformidade e classificação das obras de acordo com o lote global. ...	74
Tabela 13 - Conformidade total das obras para as classes de resistência de C10 a C65.....	76
Tabela 14 - Conformidade total das obras para as classes de resistência de C30 a C50.....	77
Tabela 15 - Não-conformidade total do concreto para as classes de C10 a C65.....	78
Tabela 16 - Não-conformidade total do concreto para as classes de C30 a C50.....	78
Tabela 17 - Exemplos abaixo da máxima tensão resistente de cálculo ($f_{ck,est} < \sigma_{cd}$).	80
Tabela 18 - Não-conformidade por precipitação pluviométrica.....	83
Tabela 19 - Desvio-padrão em função da condição de preparo do concreto.....	86
Tabela 20 - Resultados dos parâmetros estatísticos por critérios estimativos.	90
Tabela 21 - Redução do $f_{ck,est}$ para os critérios S, U e W em relação ao critério padrão Z.	92
Tabela 22 - Não-conformidade das classes de C10 a C65 por critérios estimativos.....	93
Tabela 23 - Comparação dos % de não-conformidades por classe de resistência.....	95
Tabela 24 - Comparação dos % de não-conformidades totais dos concretos.....	96

Tabela 25 - Parâmetros estatísticos entre os trabalhos de Santiago e do Autor.	97
Tabela 26 - As Dez Maiores Resistência Encontradas por Modalidade de Preparo.	106

1. INTRODUÇÃO

O sistema edifício é formado pela interconexão de vários subsistemas como fundações, estrutura, vedações verticais, instalações, revestimentos, esquadrias, acabamentos etc.; que são instalados num outro subsistema anteriormente executado. Em outras palavras, a construção de um edifício pode ser entendida como a execução de diversos serviços que obedecem a uma sequência lógica pré-estabelecida e totalmente dependente da conclusão total ou parcial de um serviço anterior para que o serviço posterior possa ser inicializado. Além da sua finalidade própria, cada subsistema tem sua parcela de responsabilidade na segurança geral do edifício, porém as parcelas de responsabilidades correspondentes aos subsistemas fundações e estrutura são extremamente mais elevadas, visto que, uma falha mais grave em um desses dois subsistemas pode levar a um colapso da edificação (BATLOUNI NETO, 2005).

Para se evitar que essas falhas mais graves ocorram numa edificação, precisa-se dar a máxima atenção a fatores como projeto, materiais, execução, ensaios, utilização e manutenção. Um projeto bem elaborado, objetiva determinada resistência e durabilidade e para tal, ele deve levar em conta não só as devidas solicitações e esforços incidentes, como também o nível de exposição e de agressividade do meio ambiente. Os materiais precisam ser corretamente especificados para cada destinação e periodicamente ensaiados para aferir sua qualidade. A execução tem que respeitar as boas práticas construtivas e as peculiaridades dos serviços e dos materiais. Os ensaios são necessários para comprovar se as qualidades dos materiais e dos serviços atenderam realmente as especificações de projeto (MITIDIERI FILHO, 2010).

No Brasil, salvo raras exceções, a indústria da construção utiliza essencialmente o material concreto armado para a execução dos subsistemas fundações e estrutura nos edifícios residenciais e comerciais. O concreto armado é formado pela junção de dois outros materiais, o aço e o concreto simples, onde ele acolhe para si as propriedades mecânicas desses dois materiais e se transforma num material novo e diferente tanto do aço quanto do concreto simples (ISAIA, 2005; FUSCO, 2011).

O rigoroso controle de fabricação dos aços utilizados nas armações de concreto armado, além do grande volume produzido em cada processo, permite ao aço ter sua qualidade consolidada e requer ensaios com uma periodicidade mais espaçada. Em contrapartida, o outro material constituinte do concreto armado, o concreto simples, não conta com tanta certeza. Mesmo quando fabricado com o rigor necessário, a variabilidade dos materiais e os

pequenos volumes produzidos por cada vez, requerem deste material um controle incisivo e permanente para a certificação da sua qualidade (PACHECO; HELENE, 2013).

É a partir desta certificação da qualidade do concreto que o trabalho irá dissertar.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral dessa pesquisa é conhecer a qualidade dos concretos usados nas construções de edifícios da Região Metropolitana do Recife, a partir de dados coletados em diversos exemplares, comparando os valores das suas resistências à compressão aos 28 dias com suas respectivas resistências especificadas e analisar os resultados obtidos por parâmetros estatísticos e normativos.

1.2. Objetivos Específicos

Qualificar as obras pesquisadas através da conformidade total dos seus respectivos concretos;

Comparar os concretos produzidos pelas obras com os fornecidos pelas concreteiras;

Verificar as conformidades e evoluções dos concretos por anos e classes de resistências;

Comparar os resultados encontrados com os resultados de outras pesquisas semelhantes;

Caracterizar a utilização do concreto pelas obras de edifícios na Região Metropolitana do Recife.

1.3. Justificativa

A resistência à compressão, verificada pela ruptura de corpos-de-prova, é o indicador mais objetivo para avaliar a qualidade dos concretos estruturais. (VIEIRA FILHO, 2007). “Concretos fornecidos podem não estar atingindo a resistência à compressão pedida nos projetos estruturais. Polêmica envolve construtores, concreteiras, projetistas e laboratórios” (FARIA, 2009).

Essa polêmica foi matéria de capa da revista *Téchne* e, segundo Farias (2009), o problema não é pontual ou localizado, e se apresenta em inúmeras obras e em várias regiões do Brasil. Enfatizando o tema do concreto estrutural, a Associação das Empresas do Mercado Imobiliário de Pernambuco (ADEMI-PE) realizou o evento “Dia do Engenheiro 2011, Estruturas de Concreto: Melhorias de Projeto e Produção”. Nos debates da palestra ‘Ações para a melhoria do serviço de concretagem da Comunidade da Construção em Salvador-BA’,

a palestrante Profa. MSc. Tatiana Gesteira de Almeida Ferraz, coordenadora desta comunidade, foi perguntada a respeito da qualidade dos concretos produzidos e aplicados na cidade de Salvador. A resposta dela foi: “Não temos dados” (FERRAZ, 2011).

E qual a qualidade dos concretos da Região Metropolitana do Recife? Eles são produzidos com boa qualidade e de acordo com as especificações de projeto? Ou ao contrário, os construtores locais estão aplicando concretos de baixa qualidade em suas obras, forçando os limites da segurança estrutural e contribuindo para a redução da durabilidade e para o surgimento prematuro de patologias?

Responder a esses questionamentos pode propiciar uma melhoria no setor da construção civil, ao passo que fornece dados quantitativos da conformidade dos concretos utilizados na Região Metropolitana do Recife para construtoras, empresas concreteiras, laboratórios de materiais, escritórios estruturais, ao meio acadêmico e para a sociedade em geral que é a maior interessada como consumidora final do produto concreto.

1.4. Conteúdo do Trabalho

O trabalho apresenta um estudo de caso sobre a conformidade dos concretos produzidos na Região Metropolitana do Recife. Ele se divide em cinco capítulos: Introdução, referencial teórico, metodologia, resultados obtidos e discussões e considerações finais. No primeiro capítulo é abordada uma breve introdução sobre o tema, seguido pelos objetivos gerais e específicos e uma justificativa, finalizando com os conteúdos do trabalho. No segundo capítulo trata da resistência à compressão do concreto e dos conceitos normativos e estatísticos relacionados ao concreto. O terceiro capítulo aborda todas as delimitações dos dados e o desenvolvimento da pesquisa. No quarto capítulo são apresentados e comentados todos os resultados obtidos. No quinto e último capítulo são abordadas as conclusões da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. O Concreto

O concreto, seja ele para fins estruturais ou não, é um material composto formado da mistura racional entre determinados outros materiais, sendo amplamente utilizado na construção civil devido a sua capacidade de ser moldado em variadas formas e de transformar-se numa pedra artificial, decorrido um tempo após sua mistura. O concreto não-estrutural é um material de baixo custo de produção e muito simples de ser feito, seu preparo não requer técnica sofisticada, ou equipamentos específicos, ou muito menos mão-de-obra especializada. Ele também não necessita de um lugar apropriado para sua confecção, podendo ser produzido em quase qualquer lugar ou condição ambiental (HELENE; ANDRADE, 2010).

Na impossibilidade de utilizar algum de seus componentes, o concreto não-estrutural permite que esse componente possa ser substituído por outro material similar que esteja disponível, que mesmo assim, o concreto produzido com esse material substituto atenderá perfeitamente a sua finalidade inicial. Tudo isso só é cabível, quanto o concreto for produzido para suportar pequenas solicitações, ou seja, apenas aplicável para concretos de fins não-estruturais. Quando produzido para fins estruturais, projetado para resistir a maiores esforços e solicitações, seu processo de produção toma uma contexto totalmente diferente (HELENE; ANDRADE, 2010).

O concreto estrutural, por apresentar um elevado custo-benefício em comparação a outros materiais se aplica aos mais variados segmentos da construção civil, sendo o material de construção mais utilizado em todo o mundo. Ele tem produção bastante complexa, necessitando de estudo e análise prévia para caracterização dos seus materiais constituintes, além de equipamentos apropriados, operadores treinados e projetistas especializados. Por apresentar durante sua produção alta suscetibilidade às variações climáticas e grande facilidade de incorporar outros materiais ou perder parte de seus constituintes para o meio externo, o concreto estrutural precisa ser devidamente acondicionado, requerendo local apropriado, estanque e protegido de interferências externas (TANGO, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Quando projetado para resistir a determinadas solicitações, a simples substituição de algum de seus materiais constituintes ou até mesmo as mínimas variações em alguma característica desses materiais, pode alterar consideravelmente e de forma imprevisível o resultado para o qual foi inicialmente projetado. É desse concreto que se trata a dissertação, o

concreto para fins estruturais, pensado, projetado, produzido e executado dentro de todos os requisitos exigidos de qualidade e de segurança estrutural. Seja qual for a sua finalidade, estrutural ou não-estrutural, o concreto é realmente um material de construção fantástico, auxiliando em várias etapas do desenvolvimento civilizatório humano (ISAIA, 2005; TANGO, 2005; HELENE; ANDRADE, 2010).

2.1.1. Principais Capacidades do Concreto

Por melhor que tenha sido produzido, o concreto por si só não é a razão de sua utilização. O que realmente se deseja ao optar em utilizá-lo como material de construção são as suas propriedades, ou melhor, que as propriedades do concreto atinjam os níveis adequados que permitam sua utilização em determinada aplicação. O concreto, enquanto material de construção, possui duas fases distintas, ou seja, se apresenta em dois estados físicos diferentes, cada qual, com suas respectivas propriedades, peculiaridades e capacidades (HELENE; ANDRADE, 2010).

O primeiro estado é o chamado estado fresco ou estado não-endurecido e ocorre assim que os componentes do concreto são misturados. O concreto se apresenta na forma de um fluido viscoso e as suas principais propriedades nesse estado são a coesão, a consistência e a trabalhabilidade. A coesão é a capacidade do concreto em manter seu empacotamento, evitando assim a segregação entre seus constituintes. A consistência é uma medida que quantifica o quão fluido ou o quão viscoso está o concreto (GUIMARÃES, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A trabalhabilidade é uma verificação qualitativa da consistência, onde ela constata se uma determinada consistência do concreto é a mais adequada à aplicabilidade a que ele se destina. No estado fresco (plástico) o concreto apresenta sua primeira grande capacidade, a de se moldar a diferentes fôrmas, adquirindo os mais variados formatos. Em essência, a trabalhabilidade estipula o grau de facilidade que um concreto de certa consistência terá ao ser executado numa determinada peça ou molde (GUIMARÃES, 2005; NEVILLE, 2015).

O segundo estado do concreto é o estado endurecido, onde com o aumento gradual da viscosidade, cessam-se as características de fluido do concreto e inicia-se seu processo de solidificação. A principal propriedade desse estado é a resistência mecânica, ou seja, a capacidade de manter sua integridade resistindo a determinados níveis de impactos e de esforços. A segunda grande capacidade do concreto advém de um tipo particular de resistência mecânica, a resistência à compressão. Ela é a principal referência de um concreto e serve de parâmetros para todas as suas demais propriedades (JACINTHO; GIONGO, 2005;

HELENE, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

As duas principais propriedades do concreto, a trabalhabilidade e a resistência à compressão, mesmo apresentando-se em estados físicos distintos não são independentes entre si, pelo contrário, estão tão intrinsecamente relacionadas que sem a correta utilização de aditivos, o aumento no desempenho de uma influenciaria inversamente no desempenho da outra. Para potencializar essas propriedades num concreto e extrair do seu processo produtivo a melhor relação custo-benefício, faz-se necessário um total entendimento dos seus materiais constituintes e de como as diversas interações entre eles influenciam nessas mesmas propriedades (HELENE; ANDRADE, 2010; NEVILLE, 2015).

2.1.2. Componentes do Concreto

O concreto utilizado atualmente é conhecido como Concreto de Cimento Portland, fazendo referência ao seu aglomerante e principal componente, patenteado em 1824 por Joseph Aspdin. Ele também pode ser denominado de Concreto Moderno, fazendo uma clara distinção aos antigos concretos que utilizavam cinzas vulcânicas como aglomerante na sua composição. O concreto mais básico é formado pela mistura de aglomerante hidráulico, água, agregado miúdo e agregado graúdo (NEVILLE, 2015; MUNHOZ; CURTI, 2015).

Misturando-se o aglomerante hidráulico com a água forma-se a Pasta de Cimento Hidratado, responsável pelas reações químicas do processo e por envolver e aglomerar os agregados mantendo-os ligados e unidos entre si, a pasta atuará decisivamente na trabalhabilidade e na resistência à compressão do concreto. Adicionando-se o agregado miúdo à pasta, forma-se a argamassa; e após a adição do agregado graúdo à argamassa, tem-se o concreto. Por corresponderem a aproximadamente 3/4 da mistura total, os agregados consequentemente reduzem a quantidade da pasta na mistura, atenuando assim o efeito de retração da própria pasta e barateando o custo final do concreto (HELENE; ANDRADE, 2010; NEVILLE, 2015; CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015).

Para concretos que precisem de maiores níveis de desempenhos das suas propriedades, outros dois elementos são incorporados a mistura, as adições minerais e os aditivos químicos. As adições minerais dependendo de sua composição química e de sua granulometria podem atuar no concreto tanto em substituição de parte do aglomerante, como aumentando o empacotamento entre os grãos dos agregados. Os aditivos agem modificando determinadas propriedades do concreto no estado fresco, por conseguinte, essas alterações também se refletirão em modificações nas propriedades do concreto no estado endurecido. Grande parte da evolução nas propriedades do concreto se deve a também evolução dos aditivos químicos

(MARTIN, 2005; MOLIN, 2005; HELENE; ANDRADE, 2010).

Existe ainda um último componente presente em todo concreto, o ar. Anteriormente vários autores excluía o ar da relação dos componentes do concreto por ele não ser, na maioria das vezes, adicionado propositalmente à mistura, mas incorporado de maneira natural. Atualmente esse entendimento já está alterado, porém, independente disso, sua presença na mistura é certa, assim como sua influencia nas principais propriedades do concreto. Em última análise, o concreto é formado pela mistura racional de: Aglomerante Hidráulico ou Ligante (Cimento Portland); Água (Potável ou Abastecimento Público); Agregado Miúdo (Areia); Agregado Graúdo (Brita, Seixo Rolado); Aditivo Químico (Plastificante, Superplastificante, Incorporadores de Ar, Retardadores etc.); Adições Minerais (Cinza Volante, Escória de Alto-forno, Sílica Ativa, Metacaulim, Pó de Quartzo etc.); Ar (Incorporado e Aprisionado, Poros Capilares e Interlamelares); além de fibras e pigmentos (**Tabela 1**) (JACINTHO; GIONGO, 2005; HELENE, 2005; MUNHOZ; CURTI, 2015).

Tabela 1 - Referências Normativas dos Componentes do Concreto.

Componentes do Concreto	ABNT NBR
Cimento Portland	5732, 5733, 5735, 5736, 5737, 11578, 12989 e 13116
Agregados	7211
Água	15900-1
Aditivos	11768
Sílica Ativa	13956-1
Metacaulim	15894-1
Outros Materiais Pozolânicos	12653

Fonte: NBR 12655, 2015.

2.1.3. *Microestrutura e Resistência Mecânica*

Compreender as capacidades e as propriedades do concreto, assim como as funções e as influências que seus componentes exercem, é apenas parte do entendimento do material concreto. A necessária compreensão e, por conseguinte o domínio de se extrair do concreto os parâmetros projetados, requer principalmente o entendimento da sua microestrutura e das diversas interações químicas e físicas que ocorrem entre seus componentes no nível microscópico. Com foco sempre na resistência mecânica à compressão do concreto, expõem-se adiante as causas primárias do seu aparecimento e as razões pelas quais seu desempenho é

influenciado (ISAIA, 2010).

2.1.3.1. Compostos do Cimento Anidro

Responsável pelas reações químicas de endurecimento do cimento, o clínquer é formado da calcinação a 1.450°C da mistura de 75% a 80% de Calcário e 25% a 20% de Argila. O calcário é oriundo da Calcita ou da Dolomita (Cal ou Óxido de Cálcio - CaO) e a argila é obtida da Caulinita [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_2(\text{OH})_4$; SiO_2 ; Al_2O_3 ; Fe_2O_3]. A pulverização das bolotas de clínquer em finos na ordem de 1 a 50 μm proporciona a seus grãos uma alta área de contato, ou seja, uma elevada superfície específica, variando de 330 a 490 m^2/kg , facilitando o rápido desencadeamento das suas reações químicas quando das suas hidratações. Extraído da Gipsita, o Gesso (Sulfato de Cálcio - CaSO_4) é adicionado ao clínquer para controlar e retardar o seu imediato endurecimento. O Cimento Portland, doravante chamado simplesmente de cimento, é, portanto formado por uma combinação de 95% a 97% de Clínquer pulverizado com 3% a 5% de Gesso em pó (KIHARA; CENTURIONE, 2005; BATTAGIN, Arnaldo; BATTAGIN, Inês, 2010; MUNHOZ; CURTI, 2015).

Os grãos de cimento anidro ou cimento não-hidratado são compostos de óxidos fundamentais e secundários, formados a diferentes temperaturas durante o processo de produção do clínquer. Ao ser resfriado rapidamente, de 1.450°C para 80°C, o clínquer “congela” esses óxidos no seu interior, isto é, evita a desestruturação desses mesmos óxidos por um resfriamento lento. Os óxidos fundamentais são divididos em Silicatos e em Aluminatos, sendo que cada um desses óxidos são mais conhecidos pelas abreviações de suas respectivas fórmulas químicas (BATTAGIN, Arnaldo; BATTAGIN, Inês, 2010; MUNHOZ; CURTI, 2015; NEVILLE, 2015).

Os Silicatos são formados pela Belita ou C2S (Silicato Dicálcio - $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$) e pela Alita ou C3S (Silicato Tricálcio - $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$). Os Aluminatos, também denominado de Fase Intersticial, são formados pelo C3A (Aluminato de Tricálcio - $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) e pelo C4AF (Ferroaluminato de Tetracálcio - $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$). Os óxidos secundários são a Cal Livre (Óxido de cálcio - CaO), o Periclásio (Óxido de Magnésio - MgO) e os Álcalis (Óxido de Sódio - Na_2O e Óxido de Potássio - K_2O). O processo de formação dos óxidos começa entre 900°C a 1.200°C com o desenvolvimento dos cristais de C2S; a fusão dos constituintes do C3A e do C4AF acontece entre 1.250°C a 1.350°C; a essa temperatura são gerados os primeiros cristais de C3S a partir de cristais pré-existentes de C2S e de CaO; e finalmente entre 1.350°C a 1.450°C ocorre à efetiva cristalização do C3S (BATTAGIN, Arnaldo; BATTAGIN, Inês, 2010; MUNHOZ; CURTI, 2015; NEVILLE, 2015).

Os óxidos fundamentais se encontram presentes nos grãos de cimento em proporções variadas e mesmo interagindo sempre em conjunto, cada qual individualmente transmite ao cimento sua característica própria. O C2S corresponde por 15% a 30% do total de óxidos do cimento anidro e se enfatiza pelo aumento da resistência mecânica em idades mais avançadas. Variando de 45% a 60%, o C3S é o mais abundante entre os óxidos e o principal responsável pela resistência mecânica nas primeiras idades. O C3A responde por 6% a 12% do total dos óxidos, por ser mais reagente atua decisivamente na pega do cimento, processo inicial de endurecimento, além elevar o calor de hidratação do cimento e torná-lo mais suscetível a interagir com sulfatos. Diferentemente do aluminato anterior, o C4AF é mais resistente aos sulfatos e corresponde por 6% a 8% do total de óxidos nos grãos do cimento anidro (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.1.3.2. Pasta de Cimento Hidratada

O cimento, como qualquer aglomerante hidráulico, só desenvolve suas propriedades de ligante após a hidratação dos seus compostos, ou seja, precisa que a água reaja quimicamente com os óxidos presentes nos grãos anidros para desencadear todo o processo necessário a sua solidificação. O processo inicial de hidratação do cimento anidro ocorre pelo mecanismo denominado de Dissolução-Precipitação, onde os óxidos constituintes do cimento são dissolvidos na água e convertidos em seus hidróxidos que se precipitam na forma de compostos hidratados (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Adicionada a água ao cimento, iniciam-se as reações químicas com a hidratação dos Aluminatos que originam os primeiros sólidos da pasta de cimento. O C3A e o C4AF na presença de água formam Aluminato de Cálcio Hidratado (C_4AH_{13}) que ao entrar em contato com o Sulfato de Cálcio (Gesso), também dissolvido na água, gera Sulfoaluminato de Cálcio ($C_6A\dot{S}H_{32}$), mais conhecida por Etringita (C-A-S-H) (**Figura 1**). A Etringita corresponde por 15% a 20% do total de sólidos da pasta de cimento e pode ser encontrada em dois estágios distintos. O primeiro ocorre nos primeiros minutos após o início da hidratação, ela se apresenta como Trisulfoaluminato de Cálcio Hidratado, na forma de Prismas Aciculares ou formato de agulhas (KIHARA; CENTURIONE, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 1 - Estrutura microscópica da Etringita e processo de formação da Etringita.

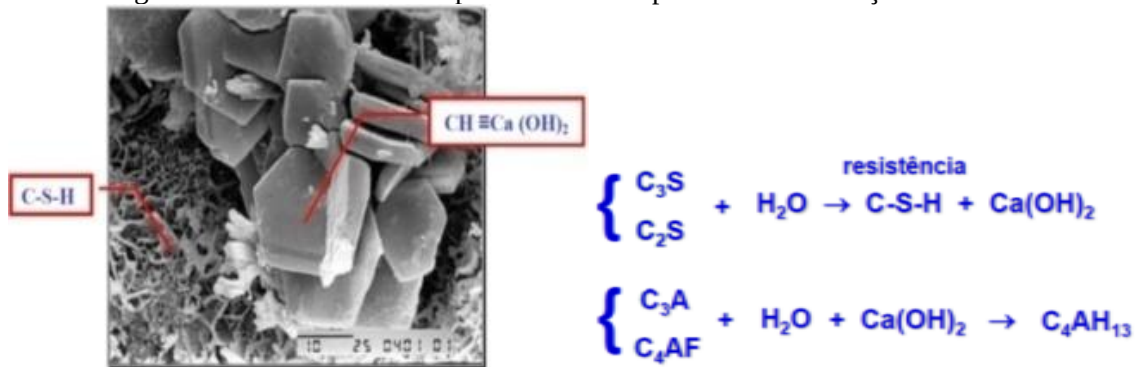


Fonte: Mehta; Monteiro, 2008; Munhoz; Curti, 2015.

Nessa forma, a Etringita recobre todo o grão do cimento, impedindo que a água possa continuar hidratando o restante do grão. Esse período, em que se cessa momentaneamente o processo de hidratação, é chamado de período de dormência do cimento ou período de latência e tem duração de duas a quatro horas. Decorrido esse período, as reações químicas já consumiram todo o gesso dissolvido na água e a Etringita começa a reagir com o Aluminato de Cálcio Hidratado, passando então, ao estágio de Monossulfoaluminato de Cálcio Hidratado no formato de Placas Hexagonais delgadas (**Figura 2**) (KIHARA; CENTURIONE, 2005; THOMAZ, 2017).

Continuando-se o processo, inicia-se a hidratação dos Silicatos. O C2S e o C3S em contato com a água geram mais dois sólidos da pasta, o Hidróxido de Cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ou Portlandita (C-H) e o Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H). Respondendo por 20% a 25% do total dos sólidos, a Portlandita (C-H) se apresenta na pasta de cimento em forma de Prismas Hexagonais. Devido a sua baixa superfície específica em relação ao Silicato de Cálcio Hidratado, sua contribuição à resistência a mecânica é mais baixa, porém atua enfaticamente na proteção das armaduras de aço no concreto armado. O Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) apresenta o percentual mais alto dentre os sólidos da pasta, de 50% a 60%, e não possui um formato geométrico tão bem delineado como os outros sólidos da pasta. (**Figura 2**). Sua morfologia indefinida lhe confere uma altíssima superfície específica, de 100 a 700 m^2/g , que somada a sua grande presença na pasta, transforma o Silicato de Cálcio no sólido de maior contribuição pela resistência mecânica da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 2 - Estrutura microscópica do C-S-H e processo de formação do C-S-H.



Fonte: Thomaz, 2017; Munhoz; Curti, 2015.

Mesmo após a hidratação inicial do cimento e com as reações de solidificação consolidadas, ainda existem no interior da pasta grãos de cimento anidro. O posterior mecanismo de hidratação desses grãos no interior da pasta, e que acontece em pouca mobilidade iônica, é conhecido como Hidratação do Estado Sólido ou mecanismo Topoquímico (MEHTA; MONTEIRO, 2008; HELENE; ANDRADE, 2010).

2.1.3.3. Relação Água/Cimento, Exsudação e Zona de Transição

A resistência mecânica do concreto se baseia primordialmente na relação água/cimento (a/c), essa relação é a razão entre a massa da água de amassamento e a massa de cimento utilizado na mistura. De acordo com a Lei de Abrams¹ (1918, apud MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 54) “A resistência à compressão do concreto é inversamente proporcional a relação água/cimento (a/c)”, ou seja, a resistência à compressão do concreto aumenta com a diminuição da relação água/cimento e diminui com o aumento dessa mesma relação. De fato, quem primeiro formulou uma regra relacionando a resistência à compressão do concreto com a relação água/cimento foi René Féret, em 1896 na França (HELENE; ANDRADE, 2010; NEVILLE, 2015).

A Lei de Abrams pode ser também entendida, adaptando-a a outras propriedades do concreto. Igualmente a resistência à compressão, a durabilidade do concreto é inversamente proporcional a relação água/cimento, ao contrario da porosidade, da permeabilidade e da trabalhabilidade que são diretamente proporcionais a relação água/cimento. Percebe-se então, que as duas principais capacidades do concreto, a resistência à compressão e a

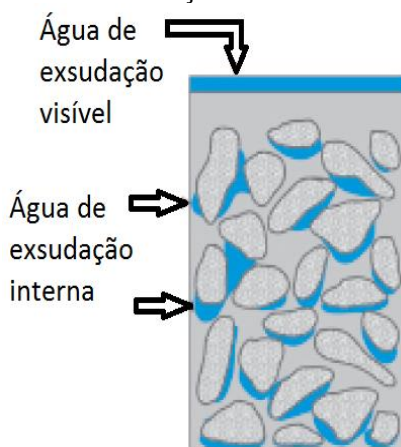
¹ ABRAMS, Duff Andrew. **Design of Concrete Mixtures**. Chicago, Structural Materials Research Laboratory, 1918. (Lewis Institute Bulletin, 1).

trabalhabilidade, são inversamente proporcionais e, portanto conflitantes entre si quando balizadas unicamente pela relação água/cimento. A busca pela adequação dessa aparente incompatibilidade entre essas duas propriedades foi uma das efetivas razões do desenvolvimento da tecnologia do concreto nas últimas décadas (MEHTA; MONTEIRO, 2008; HELENE; ANDRADE, 2010; MUNHOZ; CURTI, 2015).

Segundo Fusco (2012), uma relação água/cimento de apenas 0,28, com variação de $\pm 1\%$, já é suficiente para hidratar todo cimento anidro presente **na pasta**. Mesmo assim, **concretos** com relações água/cimento inferiores a 0,40 tendem a não serem suficientes para a completa hidratação do cimento, provocando uma elevação na quantidade de grãos de cimento anidro no interior da pasta. Essa elevação não é prejudicial ao concreto, porém gera uma estagnação do potencial que a resistência à compressão poderia atingir se os grãos de cimento anidro tivessem sido inicialmente plenamente hidratados. Para relações água/cimento superiores a mínima necessária à hidratação do cimento anidro, existirá um excedente de água que logicamente não reagiu com o cimento. Todo esse excesso de água de amassamento tenderá a migrar do interior do concreto para o meio externo num processo conhecido por Exsudação (MEHTA; MONTEIRO, 2008; HELENE; ANDRADE, 2010).

No decorrer do processo de exsudação, com o concreto ainda no estado fresco, a água vai deixando vazios capilares por todo seu trajeto migratório, aumentando a porosidade da pasta e diminuindo assim as superfícies de contato entre os constituintes do concreto. De maneira análoga, parte da água de exsudação não consegue chegar à superfície do concreto, pois tem a tendência de se concentrar ao redor das partículas de agregados, mais precisamente na zona de transição da interface pasta-agregado (**Figura 3**) (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2015).

Figura 3 - Esquema da exsudação visível e da exsudação interna.



Fonte: Mehta; Monteiro, 2008.

Segundo Paulon (2005), o efetivo estudo do concreto começa pela percepção que esse material é basicamente estruturado por três partes distintas. Grãos de agregados com diferentes granulometrias que estão totalmente envolvidos por uma pasta de cimento de determinada porosidade e entre eles, uma região denominada de Zona de Transição Pasta-Agregado, ou simplesmente, de Zona de Transição (**Figura 4**).

A zona de transição interfere diretamente na resistência à compressão do concreto principalmente quando afetada pela água de exsudação interna que provoca um aumento da relação água/cimento dessa região. Essa elevação da relação água/cimento favorece o desenvolvimento de cristais maiores de Etringita e a diminuição na concentração de C-S-H, levando a zona de transição a ter uma porosidade maior do que da própria matriz da pasta (PAULON, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2015).



Fonte: Munhoz; Curti, 2015.

A influência da exsudação interna na zona de transição tende a não ser tão preponderante nos concretos de altas resistências, devido as suas baixas relações água/cimento. Entretanto, em concretos de resistências normais e com o aumento gradual das relações água/cimento, a zona de transição se torna a parte mais frágil do conjunto concreto. Em decorrência da elevada quantidade de microfissuras e das reduzidas as áreas de contato, essa região passa a ser uma concentradora de tensões, ocasionando o rompimento prematuro do concreto pelo cisalhamento entre a pasta e os agregados (PAULON, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008; HELENE; ANDRADE, 2010; NEVILLE, 2015).

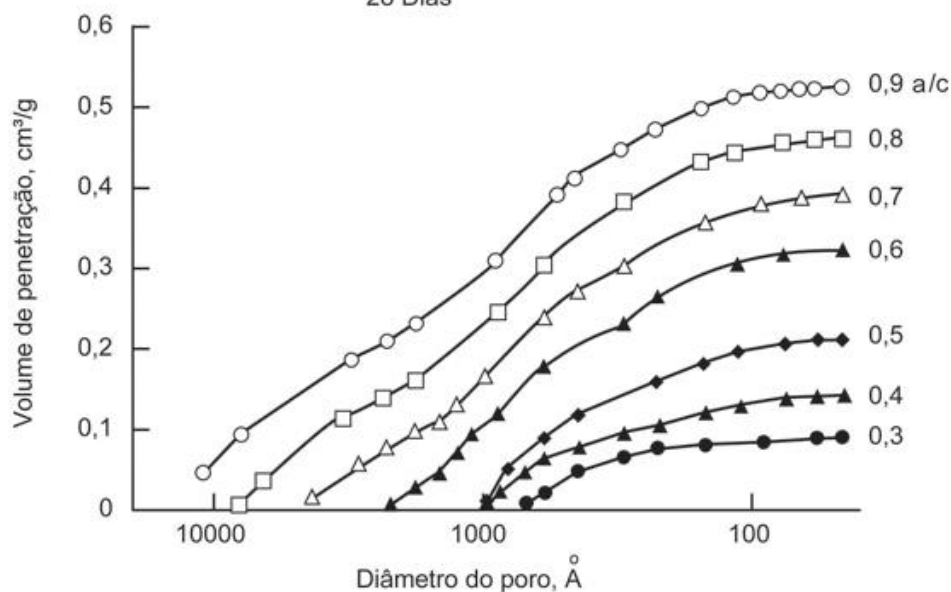
2.1.3.4. Porosidade (Índice de Vazios e Grau de Hidratação)

O concreto é pela sua natureza um material poroso e permeável. Embora em muitos casos essas duas propriedades apresentem-se co-relacionadas, elas possuem sentidos diferentes. A porosidade está ligada ao índice de vazios de um dado material, ou seja, a porosidade é a relação entre o volume de vazios e o volume total. A permeabilidade está relacionada à taxa de fluxo ou ao grau de facilidade que um fluido, líquido ou gasoso, tem em penetrar ou atravessar um dado material. No caso do concreto, os efeitos provocados pela porosidade e pela permeabilidade referem-se essencialmente a pasta de cimento hidratado e a zona de transição pasta-agregado (PETRUCCI, 1979; BAUER et al., 1979; MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2015).

Os produtos de hidratação do cimento geram não só os sólidos da pasta como também espaços não preenchidos por esses mesmos sólidos. A pasta de cimento hidratado possui quatro diferentes tipos de espaços ou vazios, o espaço interlamelar do C-S-H, os vazios capilares, o ar incorporado e o ar aprisionado. O espaço interlamelar do C-S-H, também denominado de poros de gel ou de espaços intersticiais, corresponde aos vazios entre as partículas lamelares de Silicato de Cálcio Hidratado. Esses vazios representam 28% da porosidade do C-S-H, com dimensões na ordem de $0,5 \times 10^{-6}$ mm a $0,5 \times 10^{-4}$ mm, também correspondem aos menores espaços presentes na pasta e por não se interligarem, não contribuem para a permeabilidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008; FUSCO, 2012; NEVILLE, 2015).

Os vazios capilares ou poros capilares são todos os vazios não preenchidos pelos produtos de hidratação do cimento, desconsiderando-se a participação dos espaços interlamelares como vazios. Sem um padrão definido, os poros capilares formam uma rede interligada de canalículos deixados pela migração da água de exsudação, influenciando fortemente na permeabilidade e na porosidade do concreto. Quando dentro do intervalo dimensional de $0,5 \times 10^{-4}$ mm a 0,05 mm, os vazios capilares podem receber a denominação de microporos ou de macroporos quando acima deste intervalo. A relação água/cimento predomina decisivamente na quantidade e nas dimensões dos vazios capilares, que aumentam ou diminuem proporcionalmente a essa relação. Não é só a porosidade total que interfere na resistência à compressão, mas especialmente a distribuição dos tamanhos dos vazios (**Figura 5**) (MEHTA; MONTEIRO, 2008; FUSCO, 2012; NEVILLE, 2015).

Figura 5 - Relação Água/Cimento e Diâmetro dos Poros.
28 Dias



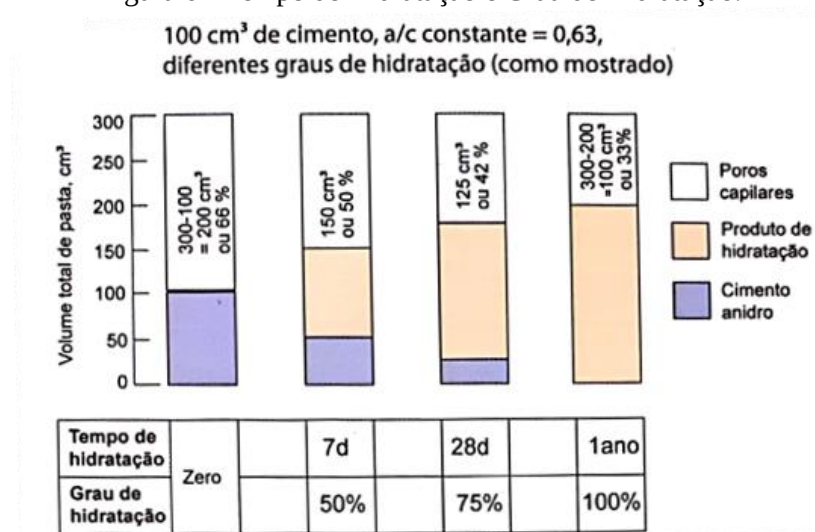
Fonte: Mehta; Monteiro, 2008

O ar incorporado é intencionalmente introduzido ao concreto durante o seu processo de mistura. O ar aprisionado se origina involuntariamente do processo de mistura e de aplicação do concreto. Ambos, atuam negativamente na impermeabilidade e na compacidade do concreto. Os vazios de ar aprisionados ou poros de compactação não possuem um padrão bem definido e suas dimensões variam de 0,5 mm a 5 mm, já os espaços de ar incorporado têm formatos esféricos e suas dimensões vão de 0,05 mm a 0,5 mm. O ar incorporado não é de todo prejudicial ao concreto, sendo muitas vezes adicionado à mistura através de aditivos que produzem a redução das dimensões das bolhas de ar para melhorar a trabalhabilidade e atenuar, quando for o caso, os efeitos do congelamento no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008; FUSCO, 2012; NEVILLE, 2015).

Para uma mesma relação água/cimento o volume inicialmente formado pela água e pelo cimento anidro não se altera após o processo de hidratação. O mesmo volume inicial se manterá, a diferença é que esse volume não estará sendo ocupado por partículas de cimento anidro e água, mas estará sendo ocupado por produtos hidratados e vazios capilares. Apesar do volume total não se alterar, a proporção entre o volume de sólidos e o volume de vazios capilares não se mantém constante ao longo do tempo. À medida que o cimento vai sendo hidratado, o volume de sólidos na pasta vai aumentando e o volume de vazios vai decrescendo. Designa-se de grau de hidratação do cimento, ao percentual entre a quantidade de cimento hidratado e a quantidade de cimento total adicionada à mistura. A partir da adição da água ao cimento anidro, grau de hidratação 0%, decorrerá aproximadamente 7 dias para

que o grau de hidratação consiga atingir 50% do seu total, 28 dias para alcançar 75% e 365 dias para consiga concluir totalmente seu processo de hidratação. Tal qual ao grau de hidratação do cimento, a resistência à compressão do concreto também acompanha a mesma escala de crescimento, portanto, a resistência à compressão não só é função da relação água/cimento, como também é função do grau de hidratação do cimento (**Figura 6**) (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2015).

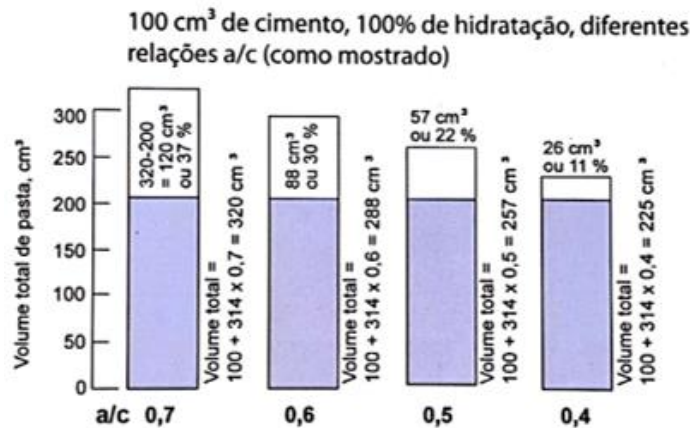
Figura 6 - Tempo de Hidratação e Grau de Hidratação.



Fonte: Mehta; Monteiro, 2008

Para diferentes relações água/cimento, mesmos volumes de cimento anidro e diferentes volumes de água, têm-se diferentes volumes totais, porém os seus respectivos volumes iniciais e finais não se alterarão durante o processo de hidratação. Fixando o mesmo grau de hidratação do cimento para todas as diferentes relações água/cimento, encontram-se iguais volumes de produtos hidratados, todavia, diferentes volumes de vazios capilares. Menores relações água/cimento terão menores quantidades de água de exsudação e produzirão menores índices de vazios, em decorrência disso, haverá o aumento da resistência à compressão (**Figura 7**) (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2015).

Figura 7 - Relação Água/Cimento e Índices de Vazios.



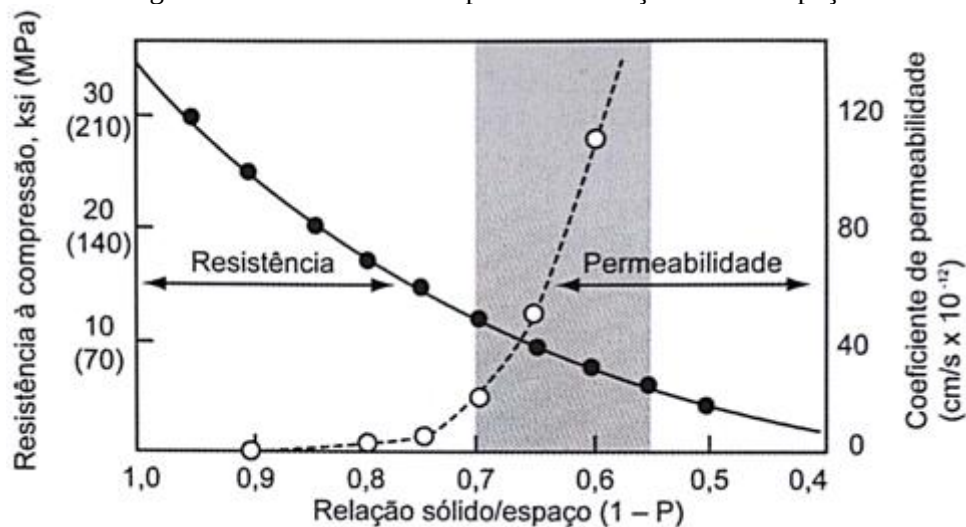
Fonte: Mehta; Monteiro, 2008

Ao realizar os estudos sobre índice de vazios e grau de hidratação, Power² (1958, apud MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 37) verificou que existia uma efetiva associação entre a resistência à compressão e a relação sólido - espaço da pasta (**Figura 8**). Ele então relacionou a resistência à compressão não com a relação água/cimento, mas com a quantidade de sólidos e vazios presentes na pasta e essa relação ficou conhecida como Fórmula de Power (**1**) (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2015).

$$f_c = a \cdot x^3 \quad (1)$$

Onde f_c é a resistência à compressão; $a = 234$ MPa e $x =$ sólidos - vazios $(1 - P)$.

Figura 8 - Resistência à Compressão e Relação Sólido/Espaço.



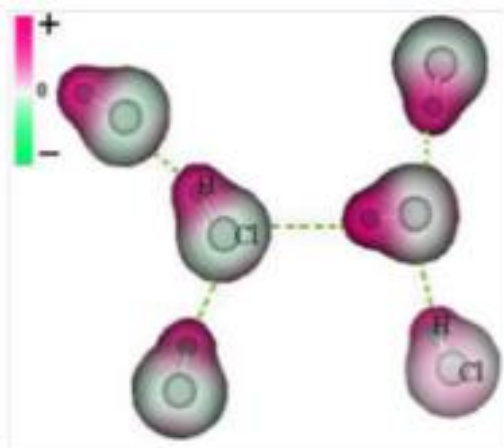
Fonte: Mehta; Monteiro, 2008

² POWER, T. C., Am. Ceram. Soc., v. 61, n. 1, pp. 1-5, 1958; and Brunauer, S., Am. Sci., v. 50, n.1, pp. 210-229, 1962.

2.1.3.5. Ligações Atômicas

Todos os diferentes estudos até então formulados, apontam para uma mesma direção. Em síntese, eles condicionam a resistência à compressão com a compacidade, com a efetiva área de contato entre os diversos constituintes. Isso se deve ao fato que a aderência entre superfícies sólidas dependem tanto das naturezas dessas superfícies, como também da extensão da área de contato entre elas. Essa ação adesiva é ocasionada pelas Forças de van der Waals, que são ligações atômicas secundárias ou fracas, isto é, com menor energia de ligação do que as ligações atômicas fortes ou primárias, isto é: iônicas, covalentes e metálicas. As forças de van der Waals podem se apresentarem em diferentes mecanismos como moléculas polares, dipolos induzidos e pontes de hidrogênio, porém todas essas interações ocorrem pela atração entre dipolos de átomos neutros. Quanto maiores às superfícies de contato no interior do concreto, maiores serão as forças de van der Waals e maior será a resistência à compressão (**Figura 9**) (MEHTA; MONTEIRO, 2008; CASCUDO, 2010).

Figura 9 - Interações polares entre moléculas de HCl, Dipolo-Dipolo.



Fonte: Moraes, 2013.

Segundo Neville (2015), a Lei de Abrams seria mais bem qualificada como uma regra, do que como uma lei propriamente dita, pois ela não contempla algumas interferências na resistência à compressão como o teor de ar incorporado, o grau de hidratação e as microfissuras provenientes da exsudação. Em essência, a resistência à compressão do concreto é função da relação água/cimento, porém ela está diretamente associada ao grau de hidratação do cimento e ao índice de vazios do concreto. Quanto maior a relação água/cimento, maior a quantidade de água que exsudará do concreto e consequentemente maiores as quantidades e as dimensões que os vazios capilares deixarão na pasta pela migração dessa água. Isso ocasiona uma maior porosidade e uma menor superfície de contato

entre os constituintes do concreto, provocando um enfraquecimento das Forças de van der Waals, reduzindo assim a resistência da pasta e da zona de transição, o que resulta consequentemente na diminuição da resistência geral concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2015).

2.2. Conceitos Normativos e Estatísticos

O concreto estrutural é um material projetado e produzido com o intuito de suportar adequadamente determinados níveis de esforços e solicitações. Porém, como qualquer outro material manufaturado ou natural, o concreto não está imune a ocorrência de falhas durante seu período de produção, de execução ou de utilização, por mais controlados e conhecidos que sejam eles. A partir da impossibilidade de eliminar totalmente a ocorrência de falhas e com o intuito de salvaguardar as estruturas e consequentemente seus usuários, é que as normas técnicas e os métodos estatísticos são incorporados à engenharia (FONTES; PINHEIRO; BITTENCOURT, 2005).

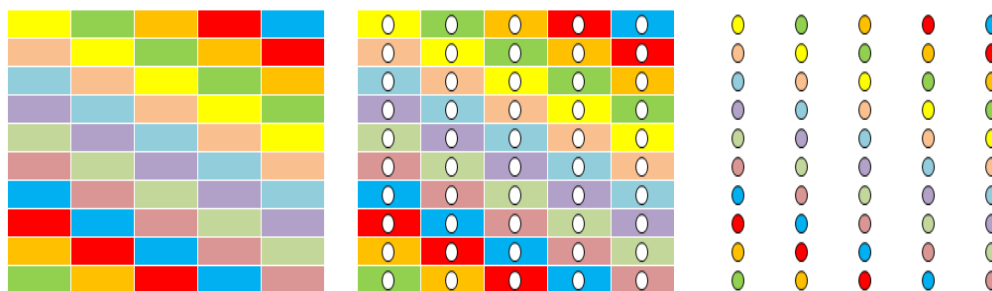
As normas técnicas são documentos contendo regras, prescrições e recomendações, consensualmente elaboradas por fabricantes, usuários e entidades técnicas e governamentais, avalizadas por uma entidade independente. Elas têm o intuito de padronizar, avaliar e regulamentar os insumos e os processos de um determinado segmento produtivo, conferindo-lhe o necessário respaldo técnico-oficial. Entre as principais entidades responsáveis pela normalização do concreto, destacam-se as norte-americanas *American Concrete Institute* (ACI) e *American Society for Testing and Materials* (ASTM), as européias *Fédération Internationale du Béton - International Federation for Structural Concrete* (FIB) e *Comité Européen de Normalisation - European Committee for Standardization* (CEN) e as sul-americanas Associação MERCOSUL de Normalização (AMN) e Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (ROMAN et. al., 2010; PACHECO; HELENE, 2013; CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015).

A estatística aplicada à engenharia atua de duas formas principais: na confiabilidade e segurança estrutural; e no controle de qualidade e de aceitação dos materiais. Na primeira, ela promove a redução das falhas a percentuais minimamente aceitáveis, através da inserção dos coeficientes de minorações nas resistências dos materiais e dos processos de execuções, dos coeficientes de majorações das tensões e solicitações e dos parâmetros para os estados limites. Na qualidade e aceitação dos materiais, a estatística fornece ferramentas de controle que sinalizam ao fabricante sobre a eficácia da qualidade da sua produção e ao consumidor, os meios para constatar a qualidade e as especificações dos produtos recebidos (FUSCO, 1976a).

Os resultados totais de resistência à compressão do concreto de uma determinada obra ou lugar podem ser representados e analisados através de uma série temporal, onde observações a respeito de certas características são verificadas em intervalos periódicos de tempo. Os resultados de que compõem uma série temporal são aleatórios ao longo do tempo, porém ao se agruparem entorno de um ponto central, originam uma curva de tendência, evidenciando o comportamento passado e uma propensão futura. Para efeito de controle e ajuste na produção do concreto, os resultados devem ser analisados em intervalos menores de tempo e isoladamente dentro de certos aspectos, de modo estocástico ou aleatório, para que os resultados analisados em cada intervalo não influenciem e nem sejam influenciados pelos demais resultados dos outros intervalos (SPIEGEL, 1968; FUSCO, 1976b; FUSCO, 2012).

A estatística conceitua população como todos os indivíduos ou valores agrupados num conjunto. Para se determinar alguma característica específica de uma população, precisa-se avaliar essa mesma característica isoladamente em todos os integrantes dessa população. No caso do concreto, onde a sua resistência à compressão é mais bem determinada pela ruptura de corpos de prova, seria necessário moldar todo o concreto pertencente a uma dada população em “N” corpos de prova e rompe-los. Ao se proceder desta maneira, a resistência à compressão seria determinada, mas a população do concreto seria totalmente destruída, obviamente inviabilizando a sua utilização. Para resolver esse tipo de impasse, as normas se utilizam de conceitos probabilísticos de estatística indutiva ou inferência estatística, para caracterizar toda uma população através da análise de apenas uma parte ou de “n” amostras dessa população, como ilustra a **Figura 10**. A partir da percepção que o entendimento normativo referente à resistência à compressão do concreto passa, necessariamente, pela compreensão de termos e modelos estatísticos, é que os conceitos e definições fundamentais para essa compreensão são apresentados neste trabalho (SPIEGEL, 1968; VIEIRA FILHO, 2007; FUSCO, 2012; BUSSAB; MORETTIN, 2017).

Figura 10 - Esquema de retirada de amostras de uma população.



Fonte: Autor.

2.2.1. Lote, Amostra e Exemplar

O procedimento para a obtenção da resistência à compressão do concreto inicia-se dividindo os volumes produzidos em populações ou lotes. Os lotes são volumes definidos de concreto, confeccionados sob as mesmas condições e para as mesmas finalidades. Dependendo do tipo de controle ou da modalidade de preparo do concreto, os lotes podem ser delimitados por volumes, ou períodos de tempo de execução, ou por trechos da estrutura ou por betonadas produzidas. Após definida a abrangência de um determinado lote é retirada dele pequenos volumes de concreto ou amostras (NBR 12655, 2015).

A coleta de amostra de concreto de um dado lote tem por finalidade fornecer material necessário à realização do ensaio de aceitação inicial do concreto, e para a confecção de exemplares que serão posteriormente ensaiados para a verificação da conformidade final do concreto. Um exemplar de determinado lote ou amostra de concreto, é formado por no mínimo dois corpos de provas, moldados logo depois de produzidos na mesma betonada e para serem ensaiados a uma mesma idade. Para cada diferente idade de ensaio de ruptura, um novo exemplar deve ser feito. Rompidos os dois corpos de provas do exemplar, e verificadas as suas respectivas resistências à compressão, será adotado o maior valor deles como referência da resistência à compressão do exemplar (NBR 12655, 2015).

A razão de tomar o maior dos resultados como referência do exemplar não se baseia em estar a favor ou contra a uma possível segurança. Ela está atrelada na determinação do máximo potencial que a resistência da amostra pode atingir. Devido às diversas variáveis envolvidas para a obtenção da resistência à compressão, o maior resultado verificado é aquele em que houve maior exatidão durante os processos, sendo, portanto, o valor mais próximo da resistência potencial do concreto produzido (ALVES, 2005; VIEIRA FILHO, 2007; FUSCO, 2012; PACHECO; HELENE, 2013; OLIVEIRA, 2016).

2.2.2. Medidas de Tendência Central e Medidas de Dispersão

A inferência sobre a resistência à compressão de um dado lote de concreto, onde foram coletados “n” exemplares, começa pela obtenção da média aritmética do conjunto formados pelos “n” resultados de compressão de cada um de seus exemplares. A média aritmética é uma medida de tendência central, ou seja, é um valor único que vai representar todos os valores de uma população, pois tende a se localizar em torno do ponto central desse conjunto. A média aritmética é um excelente valor para representar um conjunto de dados, porém não expressa muito bem a qualidade ou as variabilidades dos processos de produção, sendo para isso, necessária a obtenção de outros valores ou outros parâmetros estatísticos.

Apesar de disso, a média aritmética, definida pelas **equações 2 e 3**, é de fundamental importância, pois todas as outras medidas estatísticas necessitam de sua informação inicial para serem desenvolvidas (SPIEGEL, 1968; OLIVEIRA, 2016).

$$\mu_c = f_{cm, população} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (2)$$

$$X_m = f_{cm, amostra} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (3)$$

Onde X_i é o valor da propriedade para o *iésimo* elemento, N e n são as quantidades de elementos na população e na amostragem, respectivamente.

Para aferir a qualidade dos processos de produção utilizam-se as medidas de dispersão. A primeira delas, a Variância, definida pelas **equações 4 e 5**, é um valor que mede a variação ou a dispersão dos valores de certo conjunto de dados em relação ao valor médio desse mesmo conjunto. Essa variação localiza ou mede a distância que cada valor individual está em relação ao ponto central ou a média. Os valores dessas dispersões são propositalmente elevados ao quadrado para evitar que ao serem somados, os conjuntos de valores simetricamente contrários si anulem, anulando assim, o valor da variância (SPIEGEL, 1968; OLIVEIRA, 2016).

$$\sigma_{c, população}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_c - X_i)^2}{N} \quad (4)$$

$$S_{c, amostra}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2}{n - 1} \quad (5)$$

O desvio-padrão também é uma medida de dispersão dos valores em relação à média, porém, evidencia de forma bem mais eficientemente essa dispersão, pois, ao se extrair a raiz quadrada da variância, o desvio-padrão, definido pelas **equações 6 e 7**, faz as unidades de medidas utilizadas retornarem ao seu estado original. No caso da verificação da dispersão de um determinado conjunto de resultados de resistência à compressão do concreto, utilizando como unidade de medida o MPa, a variância ao elevar a dispersão ao quadrado, sua unidade passa a ser expressa em MPa² e o desvio-padrão ao extrair a raiz quadrada da variância,

retorna à unidade original dos valores novamente para o MPa (SPIEGEL, 1968; OLIVEIRA, 2016).

$$\sigma_{c, \text{população}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\mu_c - X_i)^2}{N}} \quad (6)$$

$$S_{c, \text{amostra}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2}{n - 1}} \quad (7)$$

Nota-se que, tanto na variância quanto no desvio-padrão, existe uma diferença entre os denominadores das fórmulas da população (N) e da amostra (n-1). Tal desigualdade inexistiria nos denominadores das médias aritméticas da população (N) e da amostra (n), pois elas se apresentam com estimativas compatíveis entre si, ou seja, o estimador da amostra é o estimador da população. O mesmo já não ocorre entre os valores das populações e das amostras nessas medidas de dispersão, onde sem o ajuste no denominador da amostra, a variância da amostra não convergiria para a variância da população (SPIEGEL, 1968; OLIVEIRA, 2016).

De acordo com Casella e Berger (2010, p.191)

As relações entre uma estatística e um parâmetro de população, são exemplos de estatísticas não-viesadas ou não-tendenciosas. Se a variância da amostra fosse definida como a média usual dos desvios quadráticos com (n) em vez de com (n-1) no denominador, então a variância da amostra não seria um estimador não-viesado da variância da população, e sim, um estimador tendencioso da população.

Segundo Fusco (2012, p. 73 e 74) a utilização ou não do denominador (n-1) pode-se ser também assim explicado:

Considerando a figura formada pela sua distribuição de frequências relativas, os valores das médias da população e da amostra são iguais à abscissa do centro de gravidade dessa figura, não precisando assim, ajustar o denominador da amostra. A variância da população corresponde ao momento de inércia dessa figura, calculado em relação ao eixo baricêntrico da população, fornecendo o valor do correspondente raio de giração. Como o

momento de inércia da amostra tem seu valor mínimo em relação a seu próprio eixo baricêntrico, ele é menor que o momento de inércia da amostra em relação ao eixo baricêntrico da população. Essa diferença pode ser praticamente anulada alterando-se o valor de (n) para (n-1) no denominador da expressão da amostra.

Quando os dados analisados tendem a uma distribuição normal, o desvio-padrão engloba os seguintes percentuais dos valores populacionais, ou seja, abrange os decorrentes intervalos de confiança (**Tabela 2**), cujos números extremos são denominados de limites de confiança (SPIEGEL, 1968; CASELLA; BERGER, 2010; OLIVEIRA, 2016):

Tabela 2 - Valores Populacionais Englobados pela variação do desvio-padrão.

Intervalo de variação do desvio-padrão em relação à Média	Percentuais dos Valores Populacionais
$X_m \pm 1 \times S_d$	68,27% dos dados
$X_m \pm 2 \times S_d$	95,45% dos dados
$X_m \pm 3 \times S_d$	99,73% dos dados

Fonte: SPIEGEL, 1968; CASELLA; BERGER, 2010; OLIVEIRA, 2016.

Analisando os percentuais dos valores populacionais da **Tabela 2**, verifica-se que o intervalo de confiança entre mais ou menos três vezes o desvio-padrão já compreende quase todos os valores das amostras. Valores maiores ou menores a três vezes o desvio-padrão, denominados de *Outlier*, não tem significado estatístico e devem ser descartados das análises (OLIVEIRA, 2016).

O Coeficiente de Variação ou de Dispersão é outra medida de dispersão que transforma variações absolutas em relativas (8). Ao realizar tal fato, possibilita comparar as dispersões relativas entre diferentes conjuntos de dados (SPIEGEL, 1968; OLIVEIRA, 2016).

$$COV = V = \frac{S_c}{X_m} \times 100 \quad (8)$$

O Coeficiente de Variação geralmente é expresso em termos percentuais, o que permite classificar a amplitude de sua variabilidade em faixas (**Tabela 3**) (SPIEGEL, 1968; ROCHA, 2015; OLIVEIRA, 2016):

Tabela 3 - Classificação da Amplitude do Coeficiente de Variação.

Percentual do Coeficiente de Variação	Faixas de Variabilidade
$COV \leq 15\%$	Baixa dispersão dos dados
$15\% < COV \leq 30\%$	Média dispersão dos dados
$COV > 30\%$	Alta dispersão dos dados

Fonte: SPIEGEL, 1968; ROCHA, 2015; OLIVEIRA, 2016.

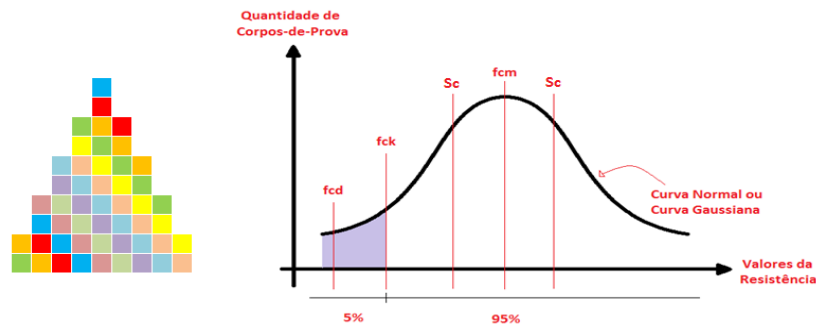
2.2.3. Distribuições de Probabilidades Contínuas

Em estatística, as distribuições de probabilidades são usadas para expressar os valores de uma população através de tabelas numéricas ou representações gráficas, facilitando o estudo e a compreensão dessa massa de dados. Elas se baseiam em alguns parâmetros dessa população, como a média e o desvio-padrão padrão, e a depender do tipo de suas variáveis ou de como se apresentam seus valores, as distribuições se dividem em discretas e contínuas. As variáveis discretas são expressas na forma de números inteiros, cujos valores exprimem contagens. As variáveis contínuas são aqueles valores obtidos por instrumentos de medição e expressos em números decimais. A resistência à compressão do concreto se enquadra na categoria de uma variável contínua, pois é obtida a partir de aparelho de medição, uma prensa hidráulica, e expressa em decimais, com precisão mínima de um décimo de MPa (FUSCO, 1976b; CASELLA; BERGER, 2010; OLIVEIRA, 2016).

A Distribuição Normal ou Distribuição Gaussiana, também conhecida por Curva Normal ou Curva de Gauss, é uma das principais distribuições contínuas de probabilidade, pois ela se ajusta a uma grande variedade de conjuntos. Por estar em função da média e do desvio-padrão, a distribuição normal é a que melhor se adéqua ao controle estatístico da resistência à compressão do concreto. A concepção da curva normal, para um determinado conjunto de resultados de compressão, se inicia com o ordenamento crescente de todos os valores dessa população e a decomposição da amplitude das suas variáveis (menor valor ao maior valor) em intervalos de classes, tantos quantos sejam mais adequados à análise. Nos intervalos de classes computam-se as suas respectivas frequências absolutas, as quantidades de exemplares compreendidos em cada intervalo de resistência, ou as suas respectivas frequências relativas, os percentuais que cada intervalo representa do total da população. Concluída a distribuição das quantidades de exemplares nos seus intervalos de classe, passa-se a construção gráfica de um histograma (SPIEGEL, 1968; FUSCO, 2012; OLIVEIRA, 2016; BUSSAB; MORETTIN, 2017).

Histograma ou Polígono de Frequência é um gráfico cartesiano em barras retangulares justapostas. No eixo das abscissas se distribui os intervalos de classes das resistências à compressão do concreto, em MPa, e no eixo das ordenadas a quantidade de exemplares alcançados por cada intervalo, em frequência absoluta ou relativa. Os cruzamentos desses dados formam barras retangulares em cada intervalo de resistência, com alturas proporcionais a suas respectivas frequências. Usando o ponto médio do topo de cada barra como referência e ligando-os por segmentos de retas, fica delineado um contorno próximo ao contorno da curva normal (**Figura 11**). A maior ou menor semelhança do contorno com a curva normal dependerá da maior ou menor quantidade de valores analisados e do espaçamento entre os intervalos de classe.

Figura 11 - Esquema do Histograma e da Curva Normal.



Fonte: Autor.

Cada população de resultados à compressão, assim distribuídos, gera uma curva normal própria, cuja Função Densidade de Probabilidade (f.d.p) é definida na **equação 9** pela sua média e pelo seu desvio-padrão padrão (FUSCO, 1976b; JACINTHO; GIONGO, 2005; CASELLA; BERGER, 2010; OLIVEIRA, 2016).

$$f_{(x,\mu,\sigma)} = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \times e^{-\frac{1}{2} \cdot \frac{(X - \mu)^2}{\sigma^2}} \quad (9)$$

2.2.4. Resistência à Compressão do Concreto

A resistência à compressão é a propriedade mais preponderante e almejada de um concreto, além de atuar diretamente na segurança estrutural, interfere em todas as demais propriedades desse mesmo concreto. Definida pela **equação 10**, ela é caracterizada pela capacidade que determinada área (A) ou seção transversal de concreto tem em suportar certos níveis de carregamentos normais ou axiais (N) (JACINTHO; GIONGO, 2005; PACHECO; HELENE, 2013; CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015; OLIVEIRA, 2016).

$$f_c = \frac{N}{A} \quad (10)$$

Segundo a NBR 6118/2014 a Resistência à Compressão do Concreto (f_c) é obtida através de ensaios da ruptura de corpos de provas cilíndricos, moldados e rompidos respectivamente conforme a NBR 5738/2016 e NBR 5739/2007. A resistência pode ser avaliada a qualquer idade j dias (f_{cj}), mas adota-se a idade de 28 dias como valor de referência.

A idade de referência aos 28 dias pode ser justificada de duas maneiras. A primeira é que a essa idade, a resistência à compressão do concreto já atingiu aproximadamente 75% da sua resistência total, sendo que, a princípio só alcançaria 100% da sua resistência à idade de 365 dias, um período muito longo para proceder alguma ação corretiva. A segunda é para garantir que os ensaios de rupturas ocorram no mesmo dia da semana em que houve a moldagem dos corpos de provas, teoricamente em um dia útil da semana, onde os laboratórios de ensaios também estariam em funcionamento (MEHTA; MONTEIRO, 2008; FUSCO, 2012; OLIVEIRA, 2016).

Mesmo que o valor da resistência à compressão do concreto na estrutura ($f_{c,estrutura}$) seja determinado pelo valor da resistência à compressão do concreto de corpos de prova ($f_{c,cp}$) rompidos aos 28 dias, é fundamental perceber que essas duas resistências não são iguais, necessitando de correções (**Tabela 4**) (11) para se atingir uma igualdade (12). Ao se romper os corpos de provas aos 28 dias, obtêm-se um resultado parcial da resistência potencial do concreto, onde a resistência do concreto na estrutura ainda aumentará de 20% a 25% até o final do processo de hidratação do cimento (JACINTHO; GIONGO, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008; FUSCO, 2012).

O ensaio de ruptura dos corpos de provas são ensaios de curta duração, demoram poucos minutos, enquanto que o concreto na estrutura está submetido permanente à compressão ao longo dos anos. Esse processo de carregamento permanente ocasiona uma perda de 25% da resistência na estrutura em relação ao carregamento de curta duração. Além disso, a prensa do ensaio de ruptura aumenta em aproximadamente 5% a resistência à compressão do concreto dos corpos de provas, em decorrência do atrito gerado entre os pratos da prensa e os próprios corpos de prova (JACINTHO; GIONGO, 2005; FUSCO, 2012).

Tabela 4 - Fatores de Modificação da Resistência da Estrutura e da Resistência dos CPs.

Fator de Modificação (k_{mod})	Valor	Causa
$k_{mod,1}$	1,20	Acréscimo de resistência ao longo do tempo
$k_{mod,2}$	0,75	Correção do Ensaio de Curta Duração
$k_{mod,3}$	0,95	Correção do Atrito entre o CP e a Prensa

Fonte: FUSCO, 2012.

$$k_{mod} = k_{mod,1} * k_{mod,2} * k_{mod,3} = 1,20 * 0,75 * 0,95 = 0,85 \quad (11)$$

$$f_{c,estrutura} = k_{mod} * f_{c,cp} = 0,85 * f_{c,cp} \quad (12)$$

2.2.5. Resistência Característica à compressão do Concreto

Baseado nos Testes de Hipóteses ou testes de significância, um dado valor é denominado de característico de uma população quando ele delimita o nível ou o intervalo de confiança em que uma probabilidade $(1 - p)$ tem de ocorrer. Na prática as hipóteses estatísticas são utilizadas na tomada de decisões, onde valores amostrais são julgados para determinar toda uma população. Mesmo assim, a decisão tomada poderá ser a certa ou a errada, a probabilidade máxima de ocorrência de um erro ou fracasso na tomada de decisão chama-se de nível de significância do teste, como por exemplo, o t de Student (**Tabela 5**) (SPIEGEL, 1968; HELENE; TERZIAN, 1993).

Tabela 5 - Distribuição t de Student por nível de significância.

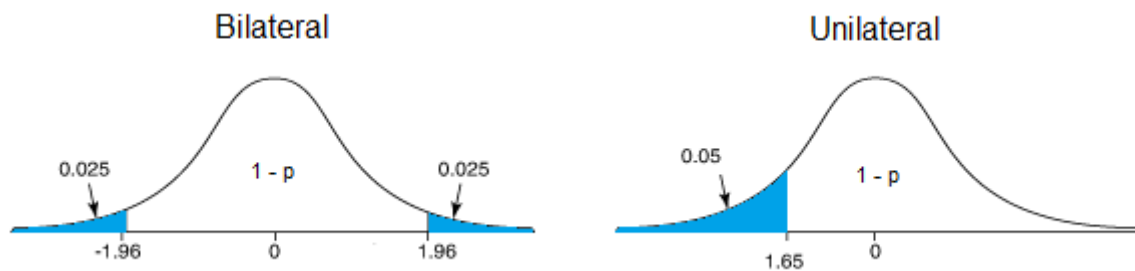
Nível de significância	50%	20%	10%	5%	1%	0,1%
Valores unilaterais	0,524	1,036	1,282	1,645	2,326	3,090
Valores bilaterais	0,674	1,282	1,645	1,960	2,576	3,291

Fonte: SPIEGEL, 1968; BUSSAB; MORETTIN, 2017.

O intervalo de confiança $(1 - p)$ é representado graficamente por uma região abaixo da distribuição normal, essa região se propaga nas duas direções a partir do eixo de simetria da curva de Gauss, a média aritmética, sendo delimitada bilateralmente pelos níveis de significâncias, nos limite inferior e superior. Quando só houver necessidade de se trabalhar com apenas um dos limites, inferior ou superior, a área do intervalo de confiança se desloca

unilateralmente para um dos extremos da curva, mas ao permanecer com a sua mesma área inicial, concentra as duas regiões do nível de significância em uma única área no lado oposto (**Figura 12**) (SPIEGEL, 1968; BUSSAB; MORETTIN, 2017).

Figura 12 - Distribuição normal por nível de significância bilareal e unilateral adaptado.



Fonte: Adaptado pelo Autor.

Segundo a NBR 6118/2014 “[...] a resistência característica inferior ($f_{ck,inf.}$) é admitida como sendo o valor que tem apenas 5% de probabilidade de não ser atingido pelos elementos de um dado lote de material”. A norma considera para o controle estatístico da resistência à compressão do concreto uma distribuição normal unilateral, percentil com nível de significância de 5% de probabilidade de resultados abaixo do limite inferior ($f_{ck,inf.}$) e intervalo de confiança de 95% de probabilidade de resultados iguais ou acima desse limite.

Doravante a notação f_{cj} será usada apenas para representar o valor de uma resistência à compressão a uma idade específica de j dias, contudo, diferente da idade de 28 dias. Exclusivamente para essa idade será utilizada a notação de f_{ck28} ou simplesmente f_{ck} , englobando também a noção do limite inferior ($f_{ck,inf.}$) e representando de forma completa o conceito de resistência característica à compressão do concreto (NBR 6118, 2014).

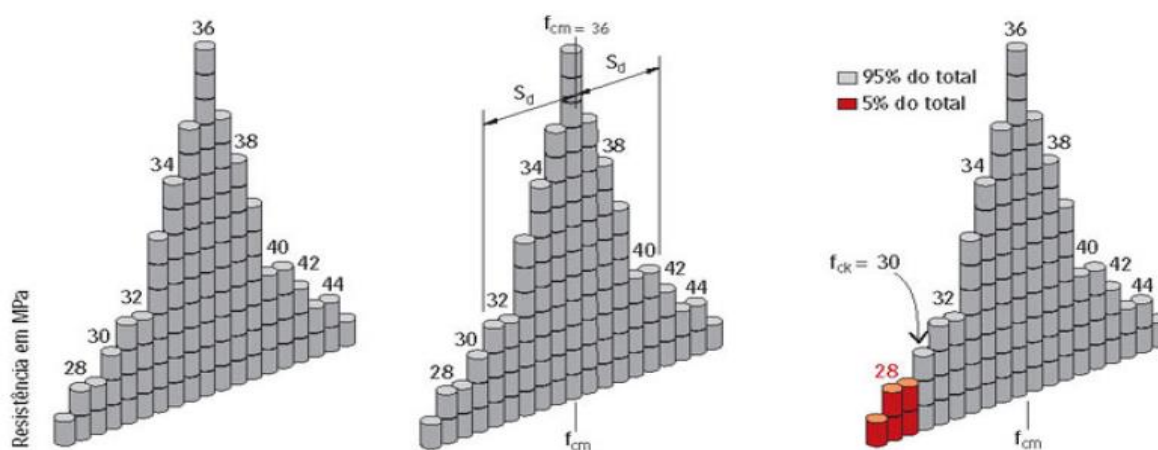
Segundo Jacintho e Giongo (2005) enquanto a norma brasileira define a resistência característica à compressão do concreto f_{ck} pelo nível de significância de 5%, a norma americana ACI adota para a sua resistência característica f'_c , o percentil com nível de significância de 1% de resultados abaixo do limite inferior. Já Pacheco e Helene (2013) afirmam que a resistência característica f'_c da ACI, corresponde na realidade ao percentil com nível de significância de 10%, pois essa norma admite que cada resultado individual possa obter como resistência mínima, um valor até 10% abaixo do limite inferior f'_c . Apesar dessa aparente contradição, Souza e Bittencourt (2003) ao analisarem um lote de 57 exemplares, em conjunto pelos critérios estabelecidos na norma americana, encontraram um nível de significância $t = 2,33$. O que de fato corresponde a uma probabilidade de apenas 1% do total

dos resultados serem menores do que a resistência característica f'_c .

Importante não se confundirem as notações e os respectivos significados de f_{ck} , f_{ck} estimado ($f_{ck,est.}$), f_{ck} especificado ($f_{ck,esp.}$) e f_{cm} . A noção pura de f_{ck} , resistência característica à compressão do concreto, advém de conceitos probabilísticos válidos para um número teoricamente infinito de resultados. O f_{ck} estimado ou estatístico é um valor característico, extraído de uma quantidade limitada de resultados amostrais, através de processos estatísticos, de acordo com o tipo do controle do concreto e da quantidade dos valores disponíveis (VIEIRA FILHO, 2007; NBR 12655, 2015; CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015).

O f_{ck} especificado é a resistência à compressão do concreto que o projetista de estruturas especifica em todas as pranchas do projeto estrutural. Ele é o mínimo valor que o f_{ck} estimado deve alcançar na execução de determinado lote de concreto. A resistência média à compressão do concreto (f_{cm}), também conhecida como resistência de dosagem do concreto, é o valor calculado acima do $f_{ck,esp.}$ com o qual o concreto deve ser produzido para se garantir que o intervalo de confiança do $f_{ck,est.}$ seja alcançado (**Figura 13**) (VIEIRA FILHO, 2007; FUSCO, 2012; NBR 12655, 2015; CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015).

Figura 13 - Esquema da obtenção da Resistência Característica



Fonte: Faria, 2009.

2.2.6. Grupos e Classes de Resistências

A partir da primeira publicação da NB-01 - Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado em 1940, passando pela alteração da nomenclatura em 1978 para NBR 6118, até a sua última versão vigente em 2014, os valores da resistência à compressão do concreto estrutural aumentaram significativamente ao longo desses anos. Atualmente a NBR 6118/2014 especifica 20 MPa como a mínima resistência à compressão que um concreto

estrutural pode ser especificado, sendo que concretos abaixo dessa resistência só devem ser utilizados em obras provisórias ou com finalidade não-estruturais (NAKAMURA, 2004; HELENE; ANDRADE, 2010; BATTAGIN, 2011; NBR 6118, 2014).

A evolução da resistência à compressão do concreto é claramente percebida através da NBR 8953/2015 - Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência, onde estão previstas todas as demais resistências para concretos estruturais aplicáveis à NBR 6118/2014 (**Tabela 6** e **Tabela 7**). Na sua primeira versão (com atualização) em 1992, as classes de resistências dos concretos estruturais variavam de 10 MPa a 80 MPa, enquanto que na atual versão de 2015, o intervalo das classes de resistências abrange de 20 MPa até 100 MPa. Além das classes de resistências previstas na própria NBR 8953/2015, ela também permite especificar resistências intermediárias entre suas classes (JACINTHO; GIONGO, 2005; NBR 8953, 1992; NBR 6118, 2014; NBR 8953, 2015; PENEDO, 2015).

Tabela 6 - Classes de resistência do Grupo I

NBR 8953		GRUPO I							
Resistência Característica à Compressão (MPa)	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Classes de Resistência (1992)	C10	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Classes de Resistência (2015)	---	---	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50

Fonte: NBR 8953, 1992; JACINTHO; GIONGO, 2005; NBR 8953, 2015.

Tabela 7 - Classes de resistência do Grupo II

NBR 8953		GRUPO II					
Resistência Característica à Compressão (MPa)	55	60	70	80	90	100	
Classes de Resistência (1992)	C55	C60	C70	C80	---	---	
Classes de Resistência (2015)	C55	C60	C70	C80	C90	C100	

Fonte: NBR 8953, 1992; JACINTHO; GIONGO, 2005; NBR 8953, 2015.

2.2.7. Resistência de Cálculo e Tensão Resistente de Cálculo

Resistência de Cálculo do Concreto (f_{cd}), definida pela **equação 13**, é a resistência própria do projetista de estruturas, onde ele minora a resistência à compressão especificada do concreto, dividindo-a pelo coeficiente de ponderação das resistências no estado-limite último (γ_c), utilizando esse menor valor da resistência para dimensionar a estrutura. A necessidade do projetista em calcular a estrutura com a resistência minorada advém da probabilidade que ocorram distorções entre os valores da resistência do concreto avaliado pelos ensaios de controle e do concreto efetivamente executado (JACINTHO; GIONGO, 2005; FUSCO, 2012; NBR 6118, 2014; CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015).

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (13)$$

Essas distorções são devidas à: aleatoriedade da homogeneidade da resistência do concreto ao longo da estrutura e da variabilidade dos materiais envolvidos (γ_{c1}); diferenças no lançamento, no adensamento e na cura do concreto da estrutura e do concreto dos corpos de provas (γ_{c2}); falhas no concreto da estrutura por erros de execução e vícios construtivos (γ_{c3}). Para o coeficiente de ponderação das resistências ou de minoração do concreto, adota-se o valor de 1,4 para combinações normais e eventualmente de 1,2 para combinações especiais ou combinações excepcionais (**14**) (FUSCO, 2012; NBR 6118, 2014; CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015).

$$\gamma_c = \gamma_{c1} * \gamma_{c2} * \gamma_{c3} = 1,4 \text{ ou } 1,2 \quad (14)$$

Se o projetista de estrutura trabalhasse exclusivamente com a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), admitiria um nível de significância de 5%, ou seja, admitiria a possibilidade que de cada cem resultados, cinco não atingissem a resistência especificada, proporção extremamente alta que refletiria em um grande número de rupturas de concreto. Ao dimensionar a estrutura com a resistência de cálculo do concreto (f_{cd}), o projetista reduz o nível de significância para 0,5% ou 5%, ou seja, admi-se que apenas cinco resultados não atingiriam a resistência específica a cada mil resultados verificados (FUSCO, 2012).

Para que de fato ocorra uma ruptura do concreto precisa-se que as condições analíticas de segurança sejam desrespeitadas na sua condição básica, que estabelece que as resistências não possam ser inferiores as tensões atuantes. Como os projetistas de estruturas tendem a

uniformizar as resistências em um único valor, mesmos para concretos que obtiveram resultados de resistências menores do que as resistências especificadas, uma ruptura só ocorreria se a tensão atuante especificamente naquela parcela mais fraca, superasse a resistência do próprio concreto (FUSCO, 2012; NBR 6118, 2014; CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2015).

2.2.8. Tensão Resistente de Cálculo

Tensão Resistente de Cálculo (σ_{cd}) é o valor máximo que uma determinada tensão pode exercer numa seção transversal, ou seja, é o esforço que pode produzir o estado-limite último (ELU) em determinada peça. As tensões resistentes de cálculo são determinadas individualmente para cada peça ou seção transversal, através das teorias das resistências dos elementos estruturais e não dependem diretamente dos valores das resistências à compressão do concreto obtido nos ensaios de ruptura de corpos de prova (JACINTHO; GIONGO, 2005; FUSCO, 2012; NBR 6118, 2014).

Mesmo que as obtenções dos valores das tensões atuantes não dependam da resistência à compressão do concreto, existe uma relação entre elas que obrigatoriamente deve ser obedecida (15). Quando na análise estrutural observam-se tensões que ultrapassam os limites dessa relação com a resistência do concreto, o projetista ou reduz os valores das tensões pelo redimensionamento da estrutura, ou determina o aumento do valor da resistência à compressão do concreto (FUSCO, 2012; NBR 6118, 2014).

$$\sigma_{cd} = k_{mod} * f_{cd} = 0,85 * \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,85 * \frac{f_{ck}}{1,4} = 0,607 * f_{ck} \quad (15)$$

2.2.9. Modalidade de Preparo do Concreto

De posse das resistências à compressão do concreto especificadas pelo projetista de estruturas, compete ao responsável técnico, designado pelo proprietário para executar a obra, a escolha da modalidade de preparo do concreto, se preparado pelo próprio construtor ou se preparado por empresa de serviço de concretagem. Quaisquer das duas modalidades que forem escolhidas, a elas caberão o cumprimento de todas as etapas de preparo do concreto, como a caracterização dos materiais constituintes, o estudo de dosagem para atender a resistência especificada, a comprovação e validação do traço e a própria fabricação do concreto (NBR 12655, 2015).

Além disso, quando a modalidade de preparo do concreto for por empresa de serviço

de concretagem, cabe a ela também o cumprimento das disposições da NBR 7212/2012 Execução de concreto dosado em central - Procedimento, tais como, a adequada estocagem e qualidade dos materiais e os controles internos de inspeções dos processos e de aceitação dos concretos produzidos. A concreteira tem a obrigação de arquivar, pelo período de cinco anos, as documentações que comprovem a observância de todas as disposições da NBR 7212/2012 e de disponibilizá-las ao construtor da obra (NBR 7212, 2012; NBR 12655, 2015).

Independente da modalidade adotada, o construtor da obra é o responsável pelo correto recebimento do concreto, pela aceitação inicial através da verificação da conformidade das propriedades do estado fresco de acordo com a NBR NM 67/1998, pela liberação, pela destinação e pela rastreabilidade do concreto. Também concerne ao construtor salvaguardar e deixar disponível por no mínimo cinco anos, laudos e relatórios de ensaios que comprovem a qualidade do concreto e o efetivo cumprimento das determinações normativas e dos projetos (NBR 12655, 2015).

2.2.10. Tipos de Controle do Concreto

Existem duas modalidades para se controlar os concretos aplicados numa obra, o controle do concreto por amostragem total (100%) e o controle estatístico do concreto por amostragem parcial. Qualquer que seja a modalidade adotada, as amostras de concreto devem ser coletas de acordo com as prescrições da NBR NM 33/1998, cabendo exclusivamente ao responsável técnico da obra a escolha do tipo de controle que será realizado para a aceitação ou para a rejeição final do concreto avaliado (NBR 12655, 2015).

No controle estatístico do concreto por amostragem parcial, uma determinada quantidade de exemplares é coletada aleatoriamente de apenas algumas betonadas de um dado lote de concreto (**Figura 14**). A formação dos lotes, de onde serão retiradas as amostras, deve atender os critérios estabelecidos na **Tabela 8**, sendo que, a quantidade mínima de exemplares em cada lote será de 6 para concretos do grupo de resistência I e de 12 para concretos do grupo de resistência II (NBR 12655, 2015).

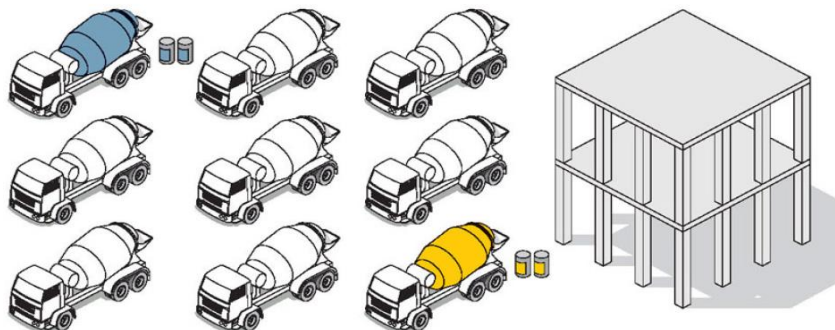
Tabela 8 - Valores máximos para formação de lotes de concreto.

Identificação (o mais exigente para cada caso)	Solicitação principal dos elementos da estrutura	
	Compressão sem e com flexão	Flexão simples
Volume de concreto	50 m ³	100 m ³
Número de andares	1	1
Tempo de concretagem	Três dias de concretagem no prazo máximo de sete dias	

Fonte: PACHECO; HELENE, 2013; NBR 12655, 2015.

No controle por amostragem parcial, também existe a possibilidade de se retirar exemplares de todas as betonadas do lote, porém sejam em algumas poucas ou em 100% das betonadas, o que de fato caracteriza esse tipo de controle é a total ausência da rastreabilidade do concreto aplicado dentro de um determinado lote (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL, 2009; FARIA, 2009; HELENE, 2011; FUSCO, 2012).

Figura 14 - Esquema do controle por amostragem parcial.



Fonte: Faria, 2009.

Para se definir a resistência à compressão estimada do concreto no controle por amostragem parcial, aplicam-se fórmulas matemáticas de acordo com a quantidade de exemplares do lote a ser julgado. Para lotes cujo número de exemplares (n) pertença ao intervalo de $6 \leq n < 20$, os resultados das resistências são ordenados de forma crescente de f_1 até f_m , e adota-se o maior valor obtido entre as **equações 16 e 17** (NBR 12655, 2015):

$$f_{ck,est} = 2 \times \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}}{m - 1} - f_m \quad (16)$$

Onde, $m = n/2$, se n for ímpar, substituir pelo par inferior mais próximo.

$$f_{ck,est} = \Psi_6 \times f_1 \quad (17)$$

Onde, Ψ_6 é dado pela **Tabela 9**, de acordo com a quantidade de exemplares.

Tabela 9 - 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

Nota₁: Os valores de n entre 2 e 5 são para casos excepcionais e calculados pela **equação 17**;

Nota₂: As condições de preparo estão estabelecidas no item 5.6.3.1 da NBR 12655/2015.

Fonte: PACHECO; HELENE, 2013; NBR 12655, 2015.

O valor da resistência característica à compressão do concreto, com número de amostras $n \geq 20$ e nível de significância de 5%, pode ser calculado por uma adaptação da distribuição normal reduzida ou de variável reduzida (escore z), de acordo com a **equação 18** (SPIEGEL, 1968; FUSCO, 1976b; SOUZA; BITTENCOURT, 2003; NBR 12655, 2015):

$$z = \frac{(X - \mu_s)}{\sigma_s} \therefore t = \frac{f_{cm} - f_{cj}}{S_d} \therefore f_{ck,est} = f_{cm} - 1,645 \times S_d \quad (18)$$

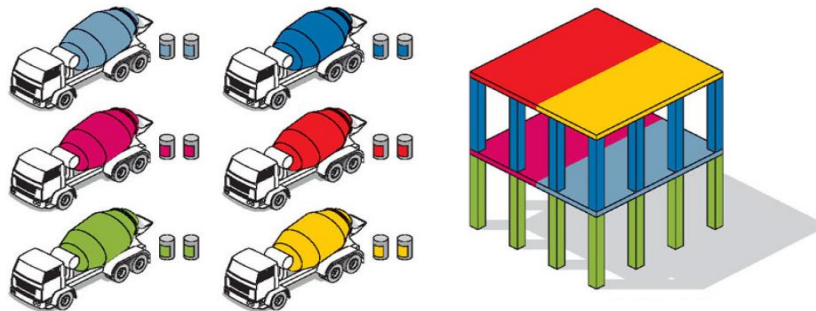
No controle do concreto por amostragem total são retiradas amostras de 100% das betonadas e todo o concreto aplicado à estrutura é rastreado. Nesse tipo de controle não existe a necessidade de se aplicarem fórmulas estatísticas para se estimar o valor da resistência à compressão do concreto, a resistência estimada de cada betonada será caracterizada pela própria resistência do seu respectivo exemplar (19). A noção de formação de lotes de concreto a serem julgados também perde parte do seu sentido original, já que, cada betonada será transformada em um lote de concreto e julgada individualmente. Mesmo assim, o conceito de formação dos lotes pode ser utilizado para aferir a variabilidade efetiva do concreto e detectar

alterações em seu processo de produção (FUSCO, 1976a; THOMAZ, 2005; FARIA, 2009; HELENE, 2011; NBR 12655, 2015).

$$f_{ck,est} = f_{c,betonada} = f_{c,exemplar} \quad (19)$$

A rastreabilidade do concreto na estrutura é o que dá sentido ao controle por amostragem total. A rastreabilidade nada mais é do que o mapeamento, ou a localização na estrutura das peças concretadas com um dado lote de concreto (**Figura 15**). Quando se conhece a resistência à compressão de um lote de concreto e o local de sua aplicação, pode-se verificar especificamente para cada peça, se as condições analíticas de segurança foram efetivamente respeitadas. Por essa razão, o controle do concreto por amostragem total é a modalidade de controle mais indicada e a mais confiável para a segurança estrutural (THOMAZ, 2005; FARIA, 2009; HELENE, 2011; RECENA; PEREIRA, 2011; NBR 12655, 2015).

Figura 15 - Esquema do controle por amostragem total.



Fonte: Faria, 2009.

Segundo Pacheco e Helene (2013) o controle do concreto no Brasil é o mais caro e seguro do mundo. As recomendações apresentadas pela NBR 12655/2006 são comparativamente muito mais rigorosas do que outras normas internacionais, a exemplo da ACI 318-11, que permite se retirar apenas uma amostra por dia e julgar grandes volumes de concretos de uma só vez. Afirmação corroborada por Magalhães e Real (2010) ao estimarem a resistência à compressão de sete lotes de concreto, comparativamente entre as normas NBR 12655/2006, ACI-214R-02 (2002) e EN-206-1 (2007).

2.2.11. Aceitação Final: Conformidade e Não-conformidade do Concreto

Compete ao responsável técnico pela execução da obra a análise da aceitação final de todos os lotes de concreto aplicados à estrutura. Um determinado lote de concreto só poderá ser aceito se todas as especificações desse concreto foram plenamente atendidas. **Salvo alguma outra propriedade específica, a aceitação final do concreto será baseada pela confrontação entre a resistência à compressão estimada e a resistência à compressão especificada, independente do tipo de controle da resistência utilizado.** Quando o $f_{ck,est} \geq f_{ck,esp}$ diz-se que o concreto analisado é conforme, e considerado imediatamente aceito. Porém, quando o $f_{ck,est} < f_{ck,esp}$ diz-se que o concreto analisado é não-conforme, e precisará ser reavaliado pelo projetista de estruturas para que seja posteriormente aceito ou definitivamente rejeitado (NBR 7680-1, 2015; NBR 12655, 2015).

Segundo Helene (1980), Helene e Terzian (1993) e Pacheco e Helene (2013) valores de f_{ck} estimado entre 5% a 10% abaixo do f_{ck} especificado devem ser aceitos sem necessidade de modificações do projeto estrutural, cabendo apenas a comunicação dos resultados ao projetista de estruturas. A aceitação de um concreto com $f_{ck,est} \geq 0,90 f_{ck,esp}$, se baseia em recomendações normativas espanholas para estimadores de pequenas amostras, onde o estimador centrado na média f_{cm} fica prejudicado quando se utiliza um número de amostras ≤ 36 exemplares.

A NBR NM 33 (1998) determina que o processo de coleta de amostras de betoneiras estacionárias ou de caminhões-betoneiras deve ser executado após a descarga dos 15% iniciais do volume total do concreto e antes dos seus 15% finais. Em conformidade com a NBR 12655 (2015) a amostra retirada desse intervalo produzirá um exemplar, formado por dois corpos de provas, cujo f_{ck} estimado será o valor da maior resistência à compressão entre os dois corpos de provas. Para Fusco (2012) a retirada de apenas uma amostra, com dois corpos de prova do terço médio, não é suficiente para se controlar efetivamente a variabilidade do processo de obtenção do $f_{ck,est}$ de uma betonada. Seria necessária a coleta de mais duas amostras, com dois corpos de prova cada, uma nos 15% iniciais da descarga e outra nos 15% finais, perfazendo três exemplares.

Fusco (2012) determinou uma relação (22) que permite controlar a variabilidade existente quando é retirada apenas uma amostra para se definir o $f_{ck,est}$. Essa relação para a aceitação do concreto, também conhecida como Critério de Fusco, foi baseada na condição (20) para a aceitação de uma betonada com três exemplares, estabelecida no item 6.3 da NBR 11562/1990. Para X_0 igual ao valor intermediário, tem-se:

$$\begin{aligned}
 X_{m\acute{a}x} - X_{m\acute{i}n} &\leq 0,15 X_0 \\
 X_{m\acute{a}x} - X_0 &= 0,075 X_0 = X_0 - X_{m\acute{i}n}
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Variação do desvio-padrão padrão para 99,73% da população:

$$\begin{aligned}
 \mu_x - 3\sigma_x &\leq X_i \leq \mu_x + 3\sigma_x \\
 X_0 - 0,075 X_0 &\leq X_0 \leq X_0 + 0,075 X_0 \\
 3\sigma_x &= 0,075 X_0 \quad \therefore \quad \sigma_x = 0,025 X_0
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Adaptando (21) em (18):

$$\begin{aligned}
 f_{ck,est} &= f_{cm} - 1,645 \times S_d \quad \therefore \quad f_{ck,est} = X_0 - 1,645 \times 0,025 X_0 \\
 f_{ck,est} &= 0,96 X_0 \quad \therefore \quad f_{ck,est} = 0,96 f_{c,exemplar}
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Onde, X_0 passa a representar o maior valor entre os dois CPs de uma única amostra retirada do terço médio da descarga do concreto.

Na **Tabela 10** são apresentadas as condições de conformidade, respectivamente pelos dois critérios de julgamento do concreto analisados.

Tabela 10 - Critério de julgamento do concreto e condição para aceitação.

Critério adotado	Condição de conformidade
NBR 12655/2015	$f_{ck,est} = f_{c,exemplar} \geq f_{ck,esp}$
Critério de Fusco (2012)	$f_{ck,est} = 0,96.f_{c,exemplar} \geq f_{ck,esp}$

Fonte: FUSCO, 2012; NBR 12655, 2015.

A Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE), mesmo em desacordo com NBR 12655/2015, recomenda a adoção do critério do Prof. Péricles Brasiliense Fusco. Critério esse testado por métodos numéricos em simulações realizadas pelo Prof. Francisco Paulo Graziano (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL, 2009).

2.3. Principais Fatores que Influenciam na Resistência à Compressão do Concreto

Dada a complexidade e a quantidade de fatores que influenciam tanto no processo de produção do concreto, quanto no controle da sua resistência à compressão, a conformidade de um concreto pode ser entendida como um evento formado por uma série de vários sucessos consecutivos. Todavia, a não-conformidade de um concreto não pode ser interpretada simplesmente como uma sequência de fracassos, pois, apenas um erro em alguma das etapas dos seus processos, já é suficiente para comprometer o resultado final da resistência à compressão desse mesmo concreto (HELENE; TERZIAN, 1993; BAUER, et al., 2010; SILVA, et al., 2010).

Como a noção de resistência à compressão do concreto está intrinsecamente associada à relação água/cimento e as suas interações como os demais componentes da mistura, quando do aparecimento de uma não-conformidade, é natural atribuir a culpabilidade pela falha ao responsável pela produção do concreto, na maioria das vezes uma concreteira. Natural sim, porém um pouco prematuro ao se afirmar sem uma precisa anamnese, visto que, o concreto também é manipulado por outros agentes no decorrer dos seus processos, como pela própria obra e pelo laboratório de ensaios de materiais (GIAMMUSSO, 1992; HELENE; TERZIAN, 1993; FARIA, 2009; ZANETTI, 2009).

A constatação de qualquer não-conformidade no concreto vai requerer a identificação da sua causa e uma rápida solução ao problema, necessitando para tal do envolvimento de todos os agentes implicados no processo, concreteira, obra e laboratório, em conjunto com o projetista de estruturas. A partir desse entendimento, são destacados os principais fatores que podem influenciar na resistência à compressão do concreto e os respectivos agentes responsáveis pelo correto desempenho de cada um desses fatores (FARIA, 2009; ZANETTI, 2009).

2.3.1. Concreteira – Preparo, Mistura e Transporte do Concreto

O preparo, a mistura e o transporte do concreto, especificamente aqui abordados, se referem à modalidade de preparo por empresa de serviço de concretagem, porém os aspectos observados também são pertinentes para a modalidade de preparo realizado pelo próprio construtor. De todas as etapas e processos ao qual o concreto é submetido, o processo de produção ou de preparo pode ser considerado o mais relevante, e não teria como ser diferente, pois é o ponto de partida para a obtenção da resistência à compressão especificada. E dentro do processo de preparo, sem dúvida, o principal fator que pode influenciar negativamente na resistência à compressão do concreto é uma dosagem inadequada (GIAMMUSSO, 1992;

HELENE; ANDRADE, 2010).

Uma dosagem inadequada pode ter como causas: o desconhecimento do comportamento ou da incorreta caracterização dos materiais utilizados na mistura; a má qualidade, a escassez ou o excesso desses mesmos componentes adicionados à mistura; o controle de umidade dos agregados, deficiente ou inexistente; o consumo de cimento por metro cúbico inapropriado; balanças e equipamentos dosadores descalibrados; falta de correção do traço a cada mudança de material ou de fornecedor; utilização da resistência de dosagem igual à resistência especificada ou com desvio-padrão menor que as recomendações da NBR 12655/2015; além do preparo do concreto para a obra errada ou com a resistência incorreta (PEREIRA, 2008; FARIA, 2009).

As empresas de serviço de concretagem realizam a dosagem do concreto em centrais dosadoras, mas não promovem a mistura do concreto em centrais misturadoras. Por razões de espaço físico, praticidade e custo, as concreteiras preferem se utilizarem de caminhões betoneiras para efetuar tanto a mistura quanto o transporte do concreto (TANGO, 2005; BORGES; GEYER, 2010; MUNHOZ; CURTI, 2015).

Dentre os fatores que podem interferir na resistência do concreto nas etapas de mistura e transporte, tem-se: a não utilização de equipamentos mais apropriados à mistura do concreto; redução das alturas das pás internas dos caminhões betoneiras devido ao desgaste (≥ 280 mm); velocidade de rotação inadequada do balão dos caminhões betoneiras (14 ± 2 RPM); demora excessiva entre a saída da concreteira e a chegada na obra, e entre a chegada na obra e a descarga do concreto (≥ 90 a 120 minutos); adição não autorizada de água para corrigir a trabalhabilidade; entrega do concreto na obra errada (TANGO, 2005; FARIA, 2009; MUNHOZ; CURTI, 2015).

2.3.2. Obra – Recebimento e Amostragem do Concreto e Moldagem dos CPs

Os procedimentos operacionais no canteiro de obra, como o recebimento e aceitação inicial do concreto, a coleta de amostra e as moldagens dos corpos de provas, devem ser feitos por funcionários treinados e habilitados. Para esses procedimentos, deve-se optar preferencialmente por laboratoristas designados pelo próprio laboratório que realizará os ensaios de ruptura dos corpos de provas e devidamente supervisionados por um técnico capacitado da construtora (FARIA, 2009; SILVA; COSER; BAUER, 2009; PACHECO; HELENE, 2013).

Na etapa de recebimento e aceitação inicial do concreto, a resistência pode ser afetada pela: incompleta conferência de todos os dados da nota fiscal e a não confrontação com o

pedido do concreto; a não observância da numeração e da inviolabilidade do lacre do caminhão betoneira; a inadequada determinação do ensaio de abatimento em desacordo com os procedimentos da NBR NM 67/1998; a aceitação de concreto com abatimento superior ao especificado na nota fiscal; a adição de água para correção da trabalhabilidade acima do limite permitido na nota fiscal; além da adição de água para redosar concretos parcialmente descarregados (TANGO, 2005; SILVA; COSER; BAUER, 2009; PACHECO; HELENE, 2013).

Os fatores que tem a capacidade de intervir na resistência à compressão, nas etapas de amostragem do concreto, moldagem e acondicionamento inicial dos corpos de provas, são: local da coleta da amostra em desacordo com a NBR NM 33/1998 (entre 15% a 85% da descarga); o reaproveitamento do concreto usado no ensaio de abatimento; procedimentos e equipamentos de moldagem dos corpos de prova em desacordo com a NBR 5738/2016; adensamento e arrasamento do topo dos corpos de provas inadequados; local de acondicionamento dos corpos de provas desnivelado e desprotegido (exposto às intempéries, pancadas, choques e vibrações); demoldagem prematura dos corpos de provas, antes de completar 24h de moldados; cura inicial inexistente ou inadequada; falha ou confusão na identificação e na rastreabilidade dos corpos de prova (TANGO, 2005; FARIA, 2009; SILVA; COSER; BAUER, 2009; ZANETTI, 2009; SILVA, et al., 2010; NBR 5738, 2016).

2.3.3. Laboratório Tecnológico – Transporte, Cura e Rompimento dos CPs

As etapas de transporte, de cura e rompimento dos corpos de prova são da competência do laboratório tecnológico de materiais. Por razões de economia, algumas construtoras preferem realizarem elas mesmas o transporte dos corpos de prova da obra até o laboratório. Segundo Silva et al. (2010) essa economia pode sair bem mais cara num futuro próximo, pois o transporte dos corpos de prova é uma das operações com maior potencial para causar alterações nos resultados de resistência.

Entre os fatores que podem comprometer os resultados de resistências nessas etapas, destacam-se: falha no preenchimento da planilha de identificação para transporte dos corpos de provas; transporte dos corpos de prova antes das 24h depois do desmolde; falta de cuidados no manuseio dos corpos de prova; armazenamento inadequado dos corpos de prova no veículo de transporte (sujeitos a pancadas, vibrações e a perda de água por evaporação) (SILVA, et al., 2010; NBR 5738, 2016).

Como fatores que podem afetar os resultados nas operações de cura e rompimento dos corpos de prova, incluem-se: acondicionamento e cura com temperaturas $(23 \pm 2)^\circ$ e umidade

relativa do ar ($\geq 95\%$) inadequadas; falha no capeamento ou na retificação dos corpos de prova; faces não paralelas entre os topos dos corpos de prova; velocidade ou taxa de aplicação da carga na prensa irregulares (0,3 MPa/s a 0,8 MPa/s); capacidade de carregamento da prensa não condizente com a resistência especificada do concreto ensaiado; falta de planicidade e irregularidades nas superfícies dos pratos da prensa devido ao desgaste (desvio máximo de 5mm); equipamentos dos ensaios descalibrados ou operados erradamente; falta ou atraso na manutenção periódica dos equipamentos dos ensaios; falta de certificação de qualidade e de acreditação dos laboratórios de materiais; falta de capacitação técnica dos laboratoristas; corpos de prova rompidos secos e fora do período de tolerância previsto para a sua respectiva idade; falhas nas medições das seções dos corpos de prova; erros na digitação e identificação dos resultados obtidos (NBR 5739, 2007; FARIA, 2009; ZANETTI, 2009; SILVA, et al., 2010; PACHECO; HELENE, 2013; NBR 5738, 2016).

2.3.4. *Projetista de Estruturas – Aceitação ou Rejeição do Concreto Analisado*

Recebidos os resultados de resistência à compressão dos concretos, enviados pelo laboratório de materiais, é importante lembrar que nem todo concreto não-conforme pode ser considerado imediatamente rejeitado, assim como, nem todo resultado pouco abaixo do $f_{ck,esp}$ pode ser considerado como aceito. Compete ao responsável técnico da obra encaminhar ao projetista de estruturas todos os resultados das resistências estimadas que ficarem abaixo da resistência especificada, juntamente com suas respectivas rastreabilidades, para que sejam por ele analisados (NBR 7680-1, 2015; NBR 12655, 2015).

O projetista de estrutura reavaliará se os valores das resistências em não-conformidade superam as tensões atuantes nas peças analisadas. Se em caso positivo com o $f_{ck,est} \geq \sigma_{cd}$, ele recomendará a aceitação desse concreto, mas em caso negativo com o $f_{ck,est} < \sigma_{cd}$, ele deverá solicitar a extração de testemunhos para a realização de novos ensaios de resistência no concreto. Perdurando ainda o descumprimento das condições analíticas de segurança, deve ser executado o projeto de reforço estrutural, ou estabelecer restrições de uso da estrutura ou até mesmo proceder à demolição total ou parcial da estrutura em não-conformidade (NBR 6118, 2014; NBR 7680-1, 2015).

3. METODOLOGIA

Para responder ao objetivo deste trabalho era fundamental a criação de um banco de dados que pudesse ser o mais representativo possível do universo a ser pesquisado. Esse banco de dados deveria ser formado pela maior quantidade possível de obras por construtoras e seus respectivos resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos por elas aplicados. As informações a cerca dos resultados de compressão do concreto geralmente encontram-se ou nos canteiros das próprias obras, durante sua fase de execução, ou após suas conclusões, em arquivos-mortos armazenados nos escritórios centrais das próprias construtoras. Por quaisquer das duas vias a serem pesquisadas, as informações estariam pouco acessíveis e bastante pulverizadas, o que limitaria em muito a quantidade de resultados necessários para formar um bando de dados representativo.

Então, o caminho mais lógico e prático era obter os resultados diretamente da fonte geradora da informação, nos próprios laboratórios tecnológicos que realizaram os ensaios das amostras. Neles, estariam concentrados os resultados de várias construtoras e suas respectivas obras, ou seja, todas as informações necessárias para a criação de um bando de dados confiável. Porém, toda essa informação ainda se encontrava inacessível para pesquisa, pois segundo a NBR 17025/2005 - Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração, os laboratórios que possuem sistema de gestão devem salvaguardar e preservar a confidencialidade dos resultados, repassando-os a terceiros apenas com a autorização dos clientes que contrataram seus serviços. Dessa forma, a pesquisa volta-se para conseguir as autorizações para acesso dessas informações com os clientes dos laboratórios de ensaios, no caso, com as empresas construtoras.

3.1. Escolha das Construtoras

De acordo com a CONDEPE/FIDEM - Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco (2017), até o ano de 2014 haviam no estado de Pernambuco 1.852 empresas atuantes na indústria da construção. Segundo o SINDUSCON/PE - Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado de Pernambuco (2017) e a ADEMI-PE (2017), atualmente as duas entidades possuem entre seus membros, respectivamente 182 e 97 empresas associadas. Dentro desses números apresentados existem construtoras dos mais variados portes, com atuação nos mais diversos segmentos e tipos de obras, utilizando diferentes processos construtivos e diferentes níveis de controles de qualidade.

Diante deste cenário, fez-se necessário filtrar e estabelecer critérios para formar uma

lista com as possíveis empresas que pudessem participar da pesquisa. Procuraram-se, neste caso, para minimizar os eventuais erros do processo de obtenção das resistências à compressão do concreto, construtoras adeptas das boas práticas construtivas e que apresentassem elevados padrões de controle de qualidade nas suas obras. Como esses atributos aparentam certa subjetividade e dificuldade de mensuração, determinou-se apenas que as construtoras que seriam procuradas fossem filiadas a ADEMI-PE ou ao SINDUSCON/PE e que fossem parceiras da Comunidade da Construção do polo Recife (CCR).

A Comunidade da Construção é um fórum criado pela ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, com polos em diversas cidades do Brasil, que fomenta entre seus participantes a capacitação permanente e a busca pela qualidade através da disseminação das boas técnicas e dos bons processos construtivos, sendo classificada como a comunidade de maior relevância da construção civil brasileira (ISAIA, 2005). O polo Recife, atualmente conta com a parceria de trinta construtoras, três universidades e mais dezoito outras entidades como laboratório tecnológico, sindicatos, associações e empresas fornecedoras de materiais e de serviços voltadas à cadeia produtiva da construção civil (COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO, 2017). Estes dois parâmetros, ao mesmo tempo em que padronizam, qualificam e confere credibilidade as fontes fornecedoras dos dados e ao próprio processo de obtenção desses mesmos dados.

Dentro desses parâmetros foram pré-selecionadas 8 das principais construtoras atuantes e pertencentes ao mercado imobiliário do estado de Pernambuco. Dessas oito construtoras, quatro delas tinha atuação apenas local, em Pernambuco; outras duas tinham atuação local e regional, no Nordeste; outra com atuação local, regional e nacional; e a última com atuação local, regional, nacional e internacional. Vale salientar também que todas elas possuíam certificações de gestão da qualidade, o que reforça ainda mais a busca pela excelência nos processos, nos produtos e nos matérias (MITIDIERI FILHO, 2010).

De posse dessa lista de construtoras pré-selecionadas, buscou-se agendar reuniões com cada um dos responsáveis pela área de engenharia dessas empresas com o intuito de apresentar o pesquisador e expor o teor, os objetivos e a seriedade da pesquisa; para ai sim, solicitar autorização para acessar e utilizar as informações de suas respectivas obras armazenados nos bancos de dados dos seus laboratórios tecnológicos parceiros. Apesar das longas tratativas para se reunir com os contatos corretos e das diversas burocracias inerentes a essa etapa da pesquisa, todas as construtoras procuradas, ao final das conversas, mostraram-se solícitas e interessadas no resultado final do trabalho. Todas elas, sem exceções, cada uma ao

seu tempo, encaminharam as devidas autorizações aos seus laboratórios parceiros para que disponibilizassem ao pesquisador as informações solicitadas.

3.2. Fonte da Coleta dos Dados (Laboratório Tecnológico)

As autorizações foram encaminhadas para dois laboratórios tecnológicos distintos, aqui chamados de **laboratório 1** e **laboratório 2**, ambos com sede na cidade do Recife e amplamente conhecidos pela indústria da construção civil local. Conforme solicitado, os laboratórios copilaram por construtora, relatórios individuais contendo todos os resultados de compressão do concreto para cada uma de suas respectivas obras. Devido à grande quantidade de relatórios, essa etapa demandou muito tempo e esforço por parte dos laboratórios.

Novamente, tendo como foco a minimização das variabilidades do processo de obtenção das resistências do concreto, resolveu-se não incluir nessa pesquisa atual os resultados fornecidos pelo laboratório 1, restando apenas os resultados fornecidos pelo laboratório 2. Essa decisão se baseou em dois critérios: o primeiro foi à participação na Comunidade da Construção do Recife, mesmo critério usado para a escolha das construtoras. O segundo, e mais decisivo, critério se baseou nas recomendações de Roman et. al. (2010) e de Pacheco e Helene (2013), onde indicam como situação ideal que o laboratório realizador dos ensaios de resistência à compressão do concreto, seja pertencente à Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio (RBLE) e que tenham os laboratoristas certificados pelo Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON).

De acordo com o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) (2017), dos cinquenta e seis laboratórios brasileiros pertencentes à RBLE, apenas dois têm sedes no Nordeste do Brasil, todos dois no estado de Pernambuco, sendo um deles o laboratório 2. Além de ser credenciado pelo INMETRO e ter seus técnicos certificados no NQCP/IBRACON - Núcleo de Qualificação e Certificação de Pessoal do Instituto Brasileiro do Concreto, o laboratório 2 é homologado pelo Ministério das Cidades como uma Instituição Técnica Avaliadora de Sistemas Construtivos Inovadores (ITA) e possui atuações nos mercados local, regional, nacional e internacional (TECOMAT, 2017). As credenciais do laboratório 2 conferem segurança e credibilidade aos dados por ele fornecidos e utilizados nessa pesquisa.

3.3. Planilha de Tratamento dos Dados

Os relatórios foram entregues em meio digital e sem a possibilidade de edição, separados em arquivos individuais por obra e compostos por múltiplas páginas em formato de

planilha (**Figura 16**). Os arquivos recebidos só permitiam a visualização ou a impressão ou a importação do seu conteúdo para outros programas, essa última possibilidade facilitou a compilação de todos os arquivos, criando um banco de dados numa única planilha geral e o seu posterior tratamento para uso nessa pesquisa.

Figura 16 - Exemplo de Relatório de Controle Estatístico por Amostragem Total.

RELATÓRIO DE CONTROLE ESTATÍSTICO POR AMOSTRAGEM TOTAL - NBR								
Obra:						Página: 1/39		
Endereço:								
Cliente:								
Série	Descrição	Idade (Dias)	Volum e (m³)	Data da Moldagem	Concreteira	fck Projeto (MPa)	fck Estim ado (MPa)	Aprovação Autom ática
1	95% E1 (Bloco 01) (1º Carro)	28 D	--	13/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	41,7	Sim
2	5% E1 (Bloco 01) e 90% E7 (Bloco 01) (2º Carro)	28 D	--	13/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	51,8	Sim
3	10% E7 (Bloco 01) e 100% E3 (Bloco 01) (3º Carro)	28 D	--	13/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	40,8	Sim
4	100% E9 (Bloco 01) (4º Carro)	28 D	--	13/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	47,5	Sim
5	95% E2 (Bloco 01) (1º Carro)	28 D	--	14/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	42,6	Sim
6	5% E2 (Bloco 01) e 100% E6 (Bloco 01) (2º Carro)	28 D	--	14/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	42,2	Sim
7	100% E4 (Bloco 01) (3º Carro)	28 D	--	14/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	43,7	Sim
8	85% E8 (Bloco 01) (4º Carro)	28 D	--	14/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	40,0	Sim
9	15% E8 (Bloco 01) (5º Carro)	28 D	--	14/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	42,6	Sim
10	85% E5 (Bloco 01) (1º Carro)	28 D	--	17/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	48,4	Sim
11	15% E5 (Bloco 01) (2º Carro)	28 D	--	17/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	44,3	Sim
12	85% E1 (Bloco 03) (1º Carro)	28 D	--	20/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	45,0	Sim
13	15% E1 (Bloco 03) e 85% E5 (Bloco 03) (2º Carro)	28 D	--	20/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	43,1	Sim
14	15% E5 (Bloco 03) e 85% E1 (Bloco 13) (3º Carro)	28 D	--	20/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	42,3	Sim
15	15% E1 (Bloco 13) e 85% E5 (Bloco 13) (4º Carro)	28 D	--	20/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	45,5	Sim
16	15% E5 (Bloco 13) e 85% E2 (Bloco 02) (5º Carro)	28 D	--	20/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	44,3	Sim
17	15% E2 (Bloco 02) e 85% E2 (Bloco 12) (6º Carro)	28 D	--	20/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	45,9	Sim
18	15% E2 (Bloco 12) (7º Carro)	28 D	--	20/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	39,9	Sim
19	60% E1 (Bloco 08) (1º Carro)	28 D	--	26/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	40,9	Sim
20	40% E1 (Bloco 08) e 15% E5 (Bloco 08) (2º Carro)	28 D	--	26/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	47,9	Sim
21	85% E5 (Bloco 08) (3º Carro)	28 D	--	26/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	40,1	Sim
22	85% E2 (Bloco 19) (4º Carro)	28 D	--	26/02/2014	NÃO INFORM ADO	20,0	34,6	Sim

Fonte: Laboratório Tecnológico 2.

Iniciada a análise dos arquivos, verificou-se uma variedade de dados e informações que poderiam ser retiradas de cada planilha, quais dessas informações seriam mais relevantes aos meios técnicos e acadêmicos e quais outras conclusões poderiam ser obtidas com o cruzamento desses mesmos dados. Consequentemente, a planilha geral do banco de dados não foi planejada, foi concebida gradativamente a partir da constatação dos dados disponíveis e do que se queria e podia extrair deles. Como o foco central da pesquisa são os resultados à compressão do concreto aos 28 dias, todas as demais informações obtidas, apenas complementam, localizam ou qualificam esses resultados. A planilha geral é composta por treze colunas, no caso treze informações (**Figura 17**): A identificação da obra e de sua construtora; a cidade, o bairro e a região político-administrativa onde se localiza; o ano e o mês da moldagem dos corpos de prova; os fcks de projeto e o resultado obtido aos 28 dias; a classificação do resultado em conforme e não conforme; a identificação da concreteira e do tipo de preparo; e o volume do lote ensaiado.

Figura 17 - Planilha de Tratamento dos Dados.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2							fck (MPa)				
3	Obra	Construtora	Bairro	RPA	Ano	Mês	Projeto	28 dias	≥ fck	< fck	Concreteira
4	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	35,4	1,0	0,0	Ñ Inform.
5	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	33,3	1,0	0,0	Ñ Inform.
6	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	35,6	1,0	0,0	Ñ Inform.
7	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	34,8	1,0	0,0	Ñ Inform.
8	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	33,9	1,0	0,0	Ñ Inform.
9	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	35,5	1,0	0,0	Ñ Inform.
10	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	31,3	1,0	0,0	Ñ Inform.
11	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	35,5	1,0	0,0	Ñ Inform.
12	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	34,6	1,0	0,0	Ñ Inform.
13	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	33,7	1,0	0,0	Ñ Inform.
14	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	30,9	1,0	0,0	Ñ Inform.
15	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	30,8	1,0	0,0	Ñ Inform.
16	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	30,2	1,0	0,0	Ñ Inform.
17	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	31,8	1,0	0,0	Ñ Inform.
18	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	35,8	1,0	0,0	Ñ Inform.
19	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	29,2	0,0	1,0	Ñ Inform.
20	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	32,8	1,0	0,0	Ñ Inform.
21	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	31,3	1,0	0,0	Ñ Inform.
22	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	35,1	1,0	0,0	Ñ Inform.
23	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	32,8	1,0	0,0	Ñ Inform.
24	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	41,7	1,0	0,0	Ñ Inform.
25	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	43,9	1,0	0,0	Ñ Inform.
26	1	1	Boa Viagem	6	2002	1	30,0	41,7	1,0	0,0	Ñ Inform.

Fonte: Autor.

3.4. Tipologia das Obras e Período de Abrangência da Pesquisa

Após a análise inicial dos arquivos e seu cruzamento com informações adicionais fornecidas pelas construtoras, verificou-se um forte padrão e uma grande homogeneidade entre suas obras. Tanto entre seus processos construtivos e controles de qualidade, em especial no que se refere ao concreto, quanto nas finalidades e nos nichos imobiliários onde eram focados seus empreendimentos. Mesmo assim, fez-se necessária uma filtragem preliminar das obras para melhor adequá-las aos objetivos da pesquisa. Foram excluídas obras fora da delimitação geográfica da pesquisa e obras com amostragens muito pequenas ou com resultados incompletos.

Desta forma, a tipologia das obras ficou assim: **obras de edifícios residenciais, empresariais e comerciais com padrões de acabamento alto e médio alto**, construídos na Região Metropolitana do Recife e no sistema de pórtico espacial em concreto armado. Todo concreto aplicado na obra, do primeiro ao último, controlado por amostragem total, com no mínimo de 100 exemplares de concreto e todos ensaiados pelo laboratório 2.

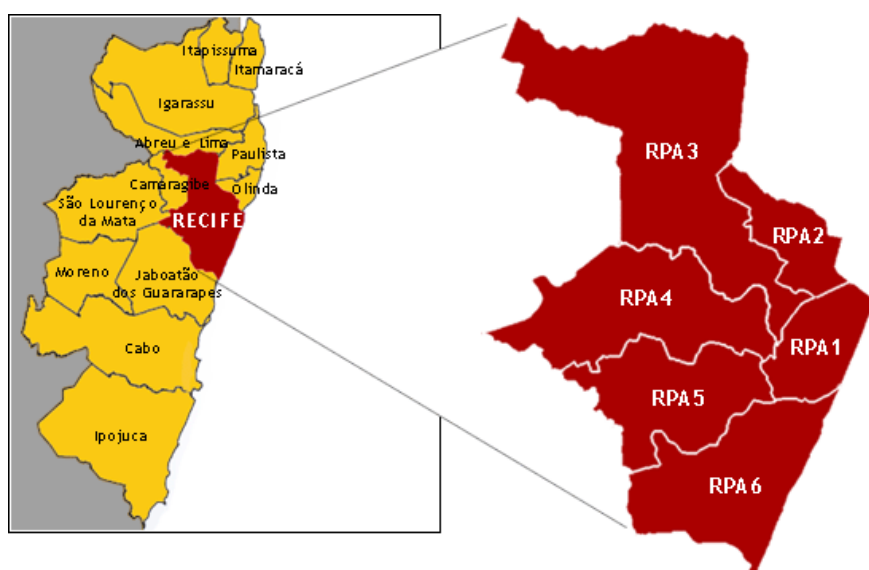
O período de abrangência dos dados também passou por uma filtragem posterior, eliminando-se as obras fora do período considerado ideal para a pesquisa que foi de **Janeiro de 2002 à Dezembro de 2016**. O limite inferior foi determinado pela diminuição substancial da quantidade de dados fornecidos anterior a essa data e o limite superior foi definido exclusivamente para fornecer tempo hábil para o tratamento e a análise dos dados dentro do período normal da dissertação.

3.5. Delimitação Geográfica dos Dados (Região Metropolitana do Recife)

Situada no Nordeste do Brasil e capital do estado de Pernambuco, a cidade do Recife é composta por noventa e quatro bairros agrupados geograficamente em seis RPA - Regiões Político-Administrativas (**Figura 18**). Recife é a principal cidade do estado e da micro-região pernambucana conhecida como RMR - Região Metropolitana do Recife, composta por ela própria e mais treze outras cidades (**Tabela 11**) (GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO, 2017; PREFEITURA DA CIDADE DO RECIFE, 2017).

De acordo com o último censo demográfico nacional, em 2010 a cidade do Recife possuía uma população de 1.537.704 habitantes, espalhados numa área territorial de 218,435 km², proporcionando um adensamento populacional de 7.039,64 hab./km². Ainda de acordo como esse último censo, em 2010 a Região Metropolitana do Recife contava uma população de 3.690.547 habitantes, fazendo dela a quinta maior região metropolitana em população absoluta do país e a primeira entre as demais regiões metropolitanas do Norte-Nordeste. A população da Região Metropolitana do Recife está inserida numa área territorial de 2.770,452 km², conferindo a ela uma densidade demográfica de 1.322,11 hab./km², o que torna essa região metropolitana no terceiro maior adensamento populacional do Brasil (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017).

Figura 18 - Mapa das micro-regiões da RMR e da cidade do Recife.



Fonte: Melo, 2018.

Tabela 11 - Composição das micro-regiões da RMR e da cidade do Recife.

Micro-Região	Localidades
RMR	Abreu e Lima, Araçoiaba, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe, Igarassu, Ilha de Itamaracá, Ipojuca, Itapissuma, Jaboatão dos Guararapes, Moreno, Olinda, Paulista, Recife e São Lourenço da Mata.
RPA 1	Recife; Santo Amaro; Boa Vista; Cabanga; Ilha do Leite; Paissandu; Santo Antônio; São José; Coelhos; Soledade; Ilha Joana Bezerra.
RPA 2	Arruda; Campina do Barreto; Encruzilhada; Hipódromo; Peixinhos; Ponto de Parada; Rosarinho; Torreão; Água Fria; Alto Santa Terezinha; Bomba do Hemetério; Cajueiro; Fundão; Porto da Madeira; Beberibe; Dois Unidos; Linha do Tiro.
RPA 3	Aflitos; Alto do Mandu; Alto José Bonifácio; Alto José do Pinho; Apipucos; Brejo da Guabiraba; Brejo de Beberibe; Casa Amarela; Casa Forte; Córrego do Jenipapo; Derby; Dois Irmãos; Espinheiro; Graças; Guabiraba; Jaqueira; Macaxeira; Monteiro; Nova Descoberta; Parnamirim; Passarinho; Pau-Ferro; Poço da Panela, Santana; Sítio dos Pintos; Tamarineira; Mangabeira; Morro da Conceição; Vasco da Gama.
RPA 4	Cordeiro; Ilha do Retiro; Iputinga; Madalena; Prado; Torre; Zumbi; Engenho do Meio; Torrões; Caxangá; Cidade Universitária; Várzea.
RPA 5	Afogados; Areias; Barro; Bongü; Caçote; Coqueiral; Curado; Estância; Jardim São Paulo; Jiquiá; Mangueira; Mustardinha; San Martin; Sancho; Tejiipió; Totó.
RPA 6	Boa Viagem; Brasília Teimosa; Imbiribeira; Ipsep; Pina; Ibura; Jordão; Cohab.

Fonte: GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO; PREFEITURA DA CIDADE DO RECIFE (2017).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Visão Geral dos Dados Coletados

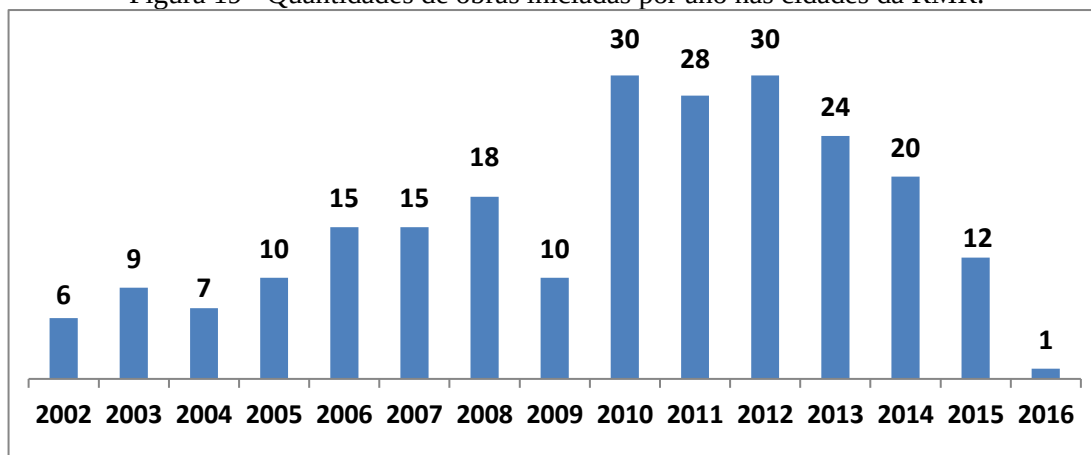
Os resultados aqui apresentados e discutidos foram obtidos através do simples tratamento, em planilha eletrônica, da massa de dados dos resultados de resistência à compressão do concreto gerado num único laboratório de materiais, devidamente autorizado a fornecê-los ao pesquisador, respectivamente pelas **8 construtoras** utilizadas na pesquisa. Os dados fornecidos pelas 8 construtoras pesquisadas são referentes a um total de **235 obras**, iniciadas e finalizadas dentro de um intervalo de **180 meses (15 anos)**.

4.1.1. Distribuição das obras por ano

As 235 obras pesquisadas são distribuídas e apresentadas respectivamente pelos anos de seus inícios (**Figura 19**) e pelos anos que duraram suas construções (**Figura 20**). Analisando as **Figura 19** e **Figura 20** podem ser observados dois períodos distintos de construções, o primeiro de 2002 a 2008 e o segundo de 2009 a 2016. No primeiro período as médias anuais conjuntas de novos lançamentos e de obras em andamento, de todas as 8 construtoras pesquisadas juntas, eram respectivamente de 11,43 e de 32,29, e individualmente por construtora de 1,43 e 4,04. No segundo período as referidas médias anuais conjuntas, dessas mesmas 8 construtoras juntas, se elevaram para 19,38 novos lançamentos e para 68,89 obras em andamento, e individualmente por construtora para 2,42 e 8,61, praticamente dobrando as atividades do setor.

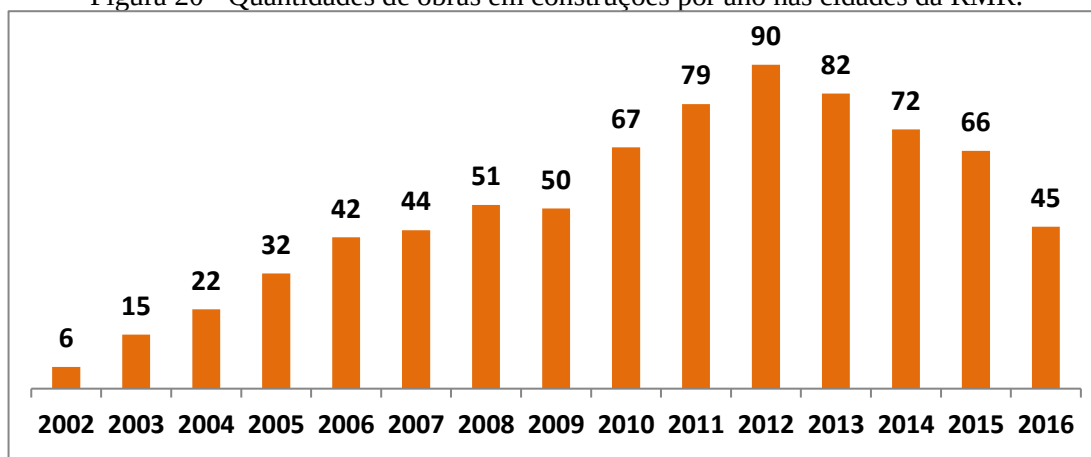
O ponto de separação desses períodos ocorre no ano de 2009, com o chamado “Boom da Construção”. Onde o governo federal promoveu o lançamento de um grande programa habitacional para pessoas de baixa renda e o aumento da oferta de crédito bancário para financiamentos imobiliários. Além da liberação de recursos públicos para construções de obras de mobilidade urbana, arenas e instalações poli-esportivas, visando dar condições mínimas para que o Brasil pudesse sediar os mega-eventos da Copa das Confederações 2013, Copa do Mundo 2014 e dos Jogos Olímpicos e Paraolímpicos 2016.

Figura 19 - Quantidades de obras iniciadas por ano nas cidades da RMR.



Fonte: Autor. As quantidades referem-se apenas as obras das 8 construtoras pesquisadas.

Figura 20 - Quantidades de obras em construções por ano nas cidades da RMR.

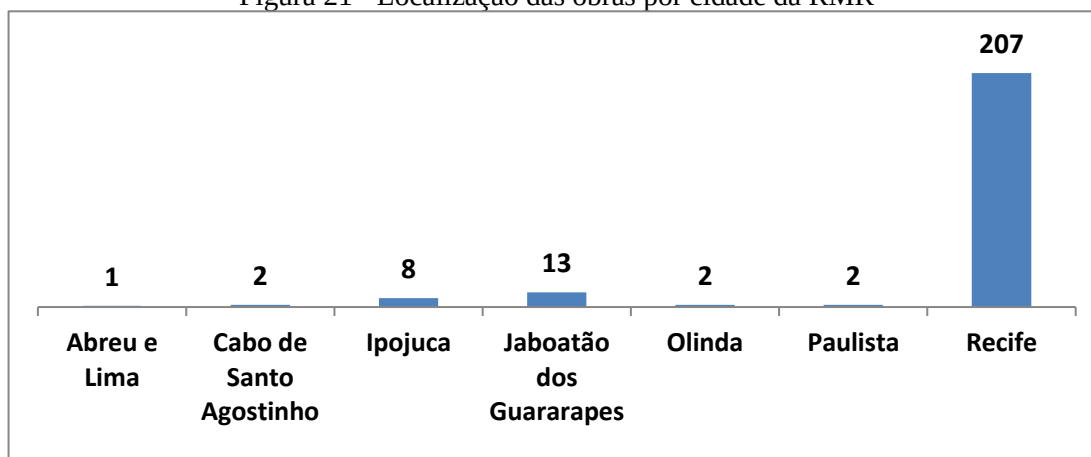


Fonte: Autor. As quantidades referem-se apenas as obras das 8 construtoras pesquisadas.

4.1.2. Distribuição das obras por cidade da RMR e por RPA da cidade do Recife

As 235 obras foram construídas em 7 cidades da Região Metropolitana do Recife (**Figura 21**), o que corresponde a 50% do total de municípios dessa micro-região. Sendo que apenas a cidade do Recife, responde por 88% do total das construções na RMR, aqui analisadas.

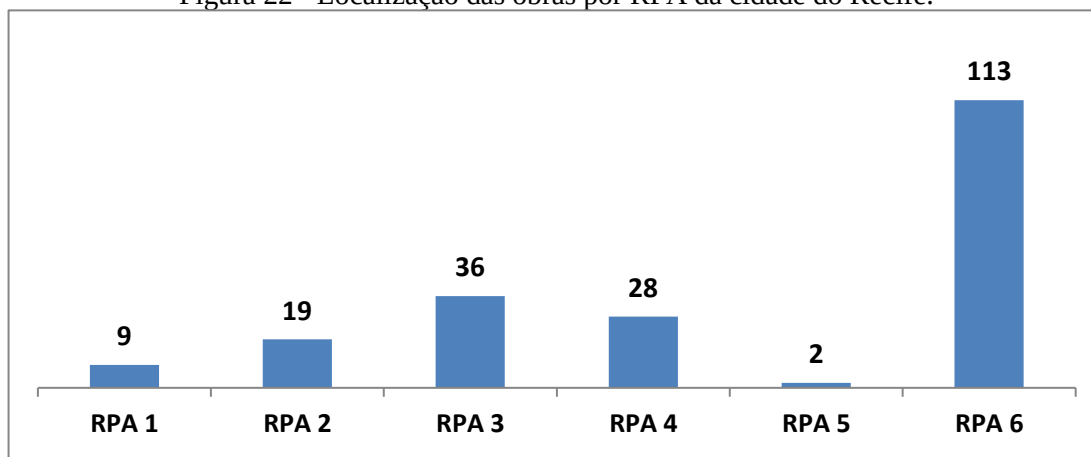
Figura 21 - Localização das obras por cidade da RMR



Fonte: Autor.

Especificamente para as 207 construções erguidas na capital pernambucana, as suas localizações abrangeram 26 bairros da cidade, o que equivale a 27,7% da sua quantidade total, e 6 regiões político-administrativas do Recife. Mesmo contemplando 100% das RPAs, nota-se pela **Figura 22** que 54,6% das obras da cidade se concentram na RPA 6, única micro-região do Recife que possui praias.

Figura 22 - Localização das obras por RPA da cidade do Recife.



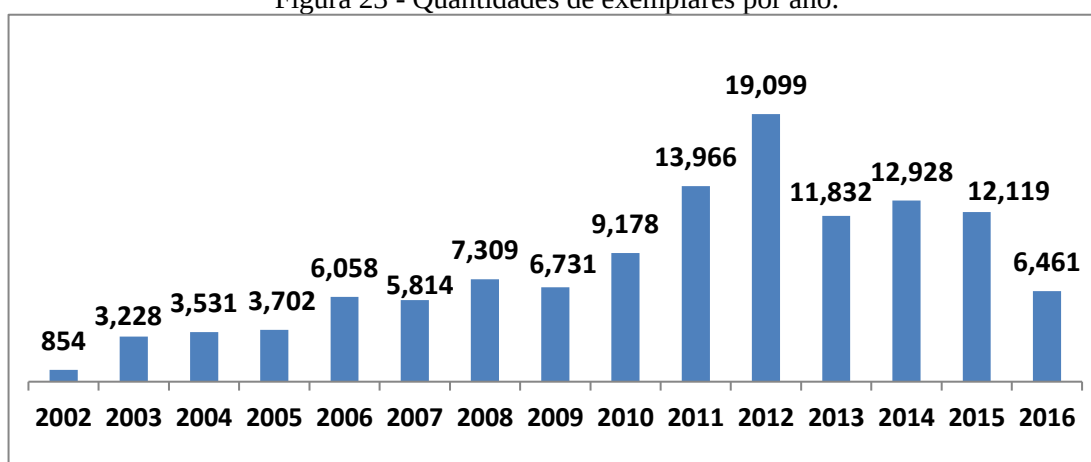
Fonte: Autor.

4.1.3. Distribuição dos exemplares por ano e classe de resistência

Para a obtenção das resistências à compressão de todos os concretos empregados nas 235 obras, o único laboratório tecnológico de materiais utilizado na pesquisa, produziu a partir do rompimento e da análise de 245.620 corpos de provas, um total de **122.810 exemplares**.

Percebe-se pela **Figura 23** que a distribuição anual dos concretos produzidos pode ser também dividida em dois períodos distintos. O período que vai de 2002 a 2009 possui uma média de 4.653 exemplares por ano e o período que vai de 2010 a 2016, com média anual de 12.226 exemplares, caracterizando um aumento no segundo período de 260% em relação ao primeiro. Admitindo-se que a produção anual do concreto fosse distribuída uniformemente em 180 meses de 23 dias úteis de trabalho cada, o total de 122.810 exemplares poderia ser também interpretado como a obtenção de aproximadamente 30 exemplares por dia, durante um período ininterrupto de verificações de 15 anos.

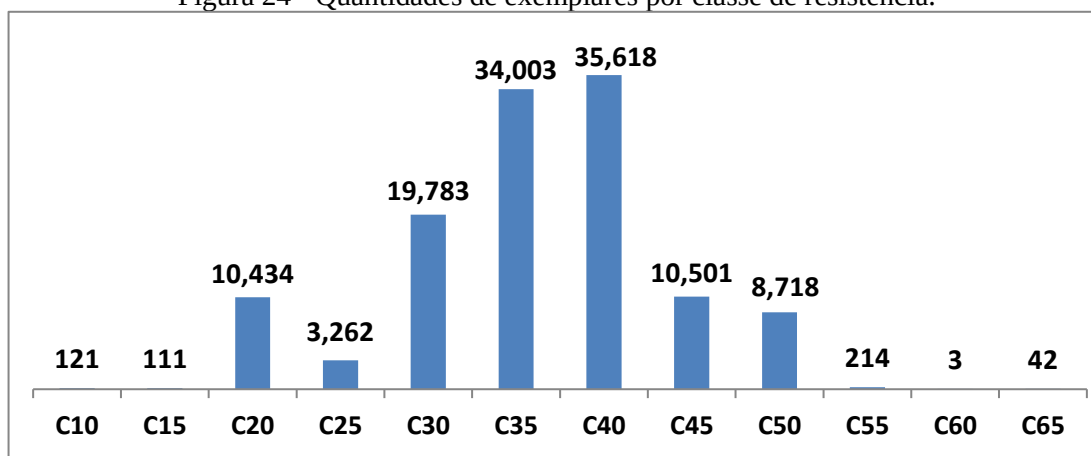
Figura 23 - Quantidades de exemplares por ano.



Fonte: Autor.

Constatou-se que os 122.810 exemplares foram produzidos com **12 diferentes classes de resistências** (C10, C15, C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50, C55, C60 e C65), contemplando os **dois grupos de resistências I e II** constantes na antiga NBR 8953/1992 (**Figura 24**). Todavia, 99,60% dos resultados se concentram apenas entre as classes de resistência de C20 a C50, com predomínio das classes C40 (29,0%), C35 (27,69%) e C30 (16,11%).

Figura 24 - Quantidades de exemplares por classe de resistência.



Fonte: Autor.

Durante as análises das planilhas dos relatórios de ensaios, verificou-se que os concretos e suas respectivas classes de resistências foram especificados ou produzidos essencialmente para fins estruturais, porém algumas classes de resistência tiveram também aplicações mais específicas ou direcionadas. Os concretos das classes C10 e C15, que na atual versão da NBR 8953/2015 não são considerados concretos estruturais, mas que no início da pesquisa ainda constavam na referida norma, foram usados muitas vezes na confecção de estacas de contenção, substratos para regularização e obras provisórias.

Observou-se também um direcionamento dos concretos das classes de resistência C20 e C25, respectivamente para o uso em fundações profundas em estacas escavadas por broca e na execução de pisos de concreto polido para estacionamentos. Por essas razões, algumas análises mostradas posteriormente, excluíram os resultados dessas classes de resistência, assim como, foram suprimido os resultados das classes C55, C60 e C65, por apresentarem quantidades pouco representativas em comparação a outras classes de resistência.

4.2. Conformidade Total das Obras

4.2.1. Conceito de lote global (LG)

O conceito de lote global não existe na literatura técnica atual, ele foi desenvolvido pelo autor que necessitou estabelecer critérios para classificar individualmente as 235 obras pesquisadas pelo percentual de conformidade de todos os concretos utilizados nas suas respectivas construções. Apesar de o lote global estar sendo primeiramente apresentado nesse trabalho, seus princípios são bem conhecidos e consolidados nos meios técnicos e acadêmicos, pois se originam e se fundamentam nas NBR 6118/2014 e NBR 12655/2015.

Para um determinado lote de concreto ser considerado conforme, admite-se até 5% de amostras “defeituosas”, ou seja, é permitido que exista num dado lote de concreto até 5% dos resultados de resistência à compressão com $f_{ck,est} < f_{ck,esp}$. Se a quantidade de resultados “defeituosos” estiver acima deste percentual, o lote é considerado não-conforme e fica caracterizado problema na sua produção (HELENE, 2011).

Como já foi exposto anteriormente, o conceito de formação de pequenos lotes para verificar a conformidade do concreto, presente na NBR 12655/2015, se adéqua bem ao controle do concreto por amostragem parcial e para controlar a variabilidade efetiva da produção de concreto, **mas poderia ser adaptado ou ampliado para também absorver o controle do concreto por amostragem total**. No controle por amostragem total cada betonada representa um lote de concreto, que fornecerá o valor de um único exemplar correspondente ao $f_{ck,est}$ deste lote, que ao ser comparado com o $f_{ck,esp}$ poderá ser classificado em conforme ou em não-conforme (NBR 12655, 2015).

O que se propõe com o conceito do lote global é a fusão entre: o entendimento de Helene (2011) acerca do conceito de conformidade e não-conformidade de um lote de concreto presente na NBR 6118/2014 e na NBR 12655/2015; o conceito de formação de lote de concreto da NBR 12655/2015, expandindo-o para um lote único de concreto; e o controle por amostragem total do concreto, classificando os resultados de modo qualitativo. Por fim, classificar as obras pela qualidade global do conjunto formado por todos os seus respectivos concretos. O processo de classificação das obras de acordo com o conceito de lote global segue o esquema apresentado na **Figura 25**.

Figura 25 - Esquema do processo de classificação da obra pelo conceito do Lote Global.

Controle por amostragem total: $f_{ck,est} = f_{c,betonada} = f_{c,exemplar}$	
Classificação de cada $f_{ck,est}$:	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Conforme se } f_{ck,est} \geq f_{ck,esp} \\ \text{Não-conforme se } f_{ck,est} < f_{ck,esp} \end{array} \right.$
Formação do lote global:	$LG = Quant. Conforme + Quant. Não - conforme$
Classificação do lote global:	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Conforme se } \% \text{ Não - conforme} \leq 5 \% \text{ de } LG \\ \text{Não-conforme se } \% \text{ Não - conforme} > 5 \% \text{ de } LG \end{array} \right.$

Fonte: Autor. LG (Lote Global), Quant. (Quantidade de exemplares) e % (Percentual de exemplares).

Devido à grande variação dos percentuais de não-conformidade das diversas obras e para uma melhor compreensão do estado geral de qualidade dos seus concretos, fez-se necessário ampliar a classificação do lote global, subdividindo os diferentes percentuais de não-conformidades em níveis de conformidades (**Tabela 12**). Todos os níveis de conformidades, aqui apresentados, partem da premissa da NBR 6118/2014 que permite até 5% do total dos resultados em não-conformidade, ou seja, permite até 1 exemplar não-conforme a cada 20 exemplares avaliados.

Essa proporção de no máximo 1:20, é o primeiro nível de conformidade ou nível A, classificando a obra como conforme. Os demais quatro níveis de conformidade, de B, C, D e E, seguem a razão de 20 exemplares avaliados aumentando-se apenas as quantidades máximas de não-conformidades permitidas em cada nível: segundo nível permite até 2 exemplares não-conformes; terceiro nível permite até 3; quarto nível permite até 4; e quinto nível, permite qualquer quantidade acima de quatro exemplares não-conformidades.

Tabela 12 - Nível de conformidade e classificação das obras de acordo com o lote global.

Nível	Condição de Não-conformidade	Classificação
A	% Não-conformidade $\leq 5\%$	Conforme
B	$5\% < \text{ \% Não-conformidade } \leq 10\%$	Não-conformidade leve
C	$10\% < \text{ \% Não-conformidade } \leq 15\%$	Não-conformidade moderada
D	$15\% < \text{ \% Não-conformidade } \leq 20\%$	Não-conformidade severa
E	% Não-conformidade $> 20\%$	Não-conformidade profunda

Fonte: Autor.

Obedecendo a esses parâmetros, montou-se uma planilha resumo (**Figura 26**) que auxiliou na classificação de todas as 235 obras em relação ao percentual de não-conformidade de seus respectivos exemplares.

Figura 26 - Representação da Planilha Auxiliar de Classificação das Obras.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1			Exemplar								
2			Quantidade		%		Nível de Conformidade				
3	Obra	Construtora	Total	≥ fck,esp	< fck,esp	≥ fck,esp	< fck,esp	A ≤ 5%		5% < B ≤ 10%	
4	1	1	656	587	69	89,5	10,5	Não Conforme		Não Conforme	
5	2	2	589	508	81	86,2	13,8	Não Conforme		Não Conforme	
6	3	3	837	779	58	93,1	6,9	Não Conforme		NC Leve	
7	4	2	435	247	188	56,8	43,2	Não Conforme		Não Conforme	
8	5	2	558	372	186	66,7	33,3	Não Conforme		Não Conforme	
9	6	1	390	327	63	83,8	16,2	Não Conforme		Não Conforme	
10	7	1	383	320	63	83,6	16,4	Não Conforme		Não Conforme	
11	8	2	243	219	24	90,1	9,9	Não Conforme		NC Leve	
12	9	2	944	742	202	78,6	21,4	Não Conforme		Não Conforme	
13	10	2	456	378	78	82,9	17,1	Não Conforme		Não Conforme	
14	11	2	395	325	70	82,3	17,7	Não Conforme		Não Conforme	
15	12	2	487	435	52	89,3	10,7	Não Conforme		Não Conforme	
16	13	2	374	137	237	36,6	63,4	Não Conforme		Não Conforme	
17	14	2	246	214	32	87,0	13,0	Não Conforme		Não Conforme	
18	15	2	576	475	101	82,5	17,5	Não Conforme		Não Conforme	
19	16	2	575	485	90	84,3	15,7	Não Conforme		Não Conforme	
20	17	3	376	310	66	82,4	17,6	Não Conforme		Não Conforme	
21	18	2	411	307	104	74,7	25,3	Não Conforme		Não Conforme	
22	19	3	318	287	31	90,3	9,7	Não Conforme		NC Leve	
23	20	2	536	502	34	93,7	6,3	Não Conforme		NC Leve	

Fonte: Autor. NC (Não-conformidade).

4.2.2. Classificação das obras pelo conceito de lote global

Analisando individualmente cada obra como sendo um único lote, formado pelo conjunto de todos os concretos por elas utilizados, pode-se classificá-las e quantificá-las de acordo com os seus percentuais de não-conformidade do concreto. Por razões de comparação, utilizou-se para tal, dois critérios distintos de julgamento do concreto, o critério normalizado presente na NBR 12655/2015 e o critério não normalizado de Fusco, porém recomendado pela ABECE (**Tabela 10**).

Na **Tabela 13** são apresentados os resultados completos, contemplado todas as classes de resistência encontradas na pesquisa, e na **Tabela 14** os resultados são apresentados, contemplando-se apenas as análises realizadas com as classes de resistência de C30 a C50.

Tabela 13 - Conformidade total das obras para as classes de resistência de C10 a C65.

Nível de conformidade	Critério NBR 12655/2015		Critério de Fusco		Classificação das obras
	Quant.	%	Quant.	%	
A	6	2,6	1	0,4	Conforme
B	38	16,2	8	3,4	NC Leve
C	44	18,7	24	10,2	NC Moderada
D	37	15,7	36	15,3	NC Severa
E	110	46,8	166	70,6	NC Profunda
Total	235	100,0	235	100,0	

Fonte: Autor. Quant. (Obra), % (Obra Não-conforme) e NC (Não-conformidade).

Observa-se que, pelo critério da NBR 12655/2015, apenas seis obras tiveram o percentual de exemplares não-conformes, igual ou abaixo do limite máximo de 5%, ou seja, apenas 6 obras estão **em conformidade (2,6%)**, à medida que 229 obras ultrapassaram esse limite, estando todas elas então, **em não-conformidade (97,4%)**. Dentro das 229 obras não-conformes, 110 obras foram classificadas com **não-conformidade profunda**, isto é, **46,8%** das obras tiveram mais de 20% dos seus exemplares em não-conformidade.

Verificando-se os resultados pelo critério de Fusco, critério esse que recomenda reduzir em 4% o valor do $f_{ck,est}$ de cada exemplar, a quantidade de obras em conformidade diminui para apenas 1 (0,4%), as obras não-conformes aumentaram para 234 (99,6%) e as obras em **não-conformidade profunda para 166 (70,6%)**.

Tabela 14 - Conformidade total das obras para as classes de resistência de C30 a C50.

Nível de conformidade	Critério NBR 12655/2015		Critério de Fusco		Classificação das obras
	Quant.	%	Quant.	%	
A	7	3,0	1	0,4	Conforme
B	33	14,2	6	2,6	NC Leve
C	31	13,3	23	9,9	NC Moderada
D	45	19,3	26	11,2	NC Severa
E	117	50,2	177	76,0	NC Profunda
Total	233	100,0	233	100,0	

Fonte: Autor. Quant. (Obra), % (Obra Não-conforme) e NC (Não-conformidade).

Analisando a conformidade total das obras apenas para as classes de resistências de C30 até C50, percebe-se que 2 obras não utilizaram concretos com essas classes de resistência em suas construções, reduzindo para 233 o total de obras apreciadas. Afora uma pequena melhora de 6 para 7 (3%) na quantidade de obras conformes pelo critério da NBR 12655/2015, nota-se que, pelos dois critérios em questão, houve um deslocamento das quantidades das obras não-conformes para a faixa da **não-conformidade profunda, respectivamente 117 (50,2%) e 177 (76,0%)**. Esse deslocamento evidencia uma maior não-conformidade nas classes de resistências de C30 até C50 quando comparadas com as demais classes em conjunto. A redução de apenas 4% da resistência estimada acarretada pela correção da amostragem do critério de Fusco, provoca uma diferença de mais de 50% entre os percentuais de não-conformidade profunda dos dois critérios.

4.3. Conformidade Total do Concreto

4.3.1. Não-Conformidade Total do Concreto por Modalidade de Preparo

Na produção total dos concretos analisados na pesquisa, observou-se o emprego de duas modalidades de preparo, usinado e “in loco”, ou seja, preparado por empresa de concretagem e preparado pela própria construtora executante da obra. Os concretos preparados na modalidade “in loco” foram produzidos para atenderem as classes de resistência C20, C25, C30, C35, C40, C45 e C50, portanto, todos eles classificados como concretos estruturais pertencentes ao grupo de resistência I da vigente NBR 8953/2015.

Apesar das obras identificarem corretamente qual a modalidade de preparo utilizou em cada exemplar, exclusivamente na modalidade de concreto usinado, algumas obras não

indicaram o nome da empresa fornecedora do seu concreto. Das outras obras que identificaram seus fornecedores de concreto, verificou-se o emprego de **9 diferentes concreteiras**. Das 9 concreteiras identificadas, apenas uma (9%) atua exclusivamente nos estados da região Nordeste e as outras oito **(91%) restantes atuam em todas as regiões do Brasil**, sendo que duas dessas são multinacionais estrangeiras com atuação em diversos outros países. Como o volume médio de concreto transportado pelas concreteiras da RMR pesquisadas foi de **7,2 m³/caminhão-betoneira**, os concretos produzidos unicamente pela modalidade de preparo usinado, aplicados nas 235 obras, geraram um **volume aproximado de 875.232,96 m³**.

Na **Tabela 15** são apresentadas as quantidades gerais e os percentuais de não-conformidade encontrados em todos os 122.810 exemplares. Esses resultados são analisados na sua totalidade, como um lote único de concreto, e separadamente conforme a modalidade de preparo, usando-se nas suas avaliações respectivamente o critério da NBR 12655/2015 e o critério de Fusco. Na **Tabela 16** as mesmas análises são apresentadas, contemplando-se apenas os concretos produzidos com as classes de resistência de C30 a C50.

Tabela 15 - Não-conformidade total do concreto para as classes de C10 a C65.

Modalidade de Preparo	Geral		NBR 12655/2015		Critério de Fusco	
	Quant. ₍₁₎	% ₍₁₎	Quant. ₍₂₎	% ₍₂₎	Quant. ₍₂₎	% ₍₂₎
Total	122.810	100,00	24.820	20,21	35.424	28,84
Usinado	121.502	98,93	24.325	20,02	34.824	28,66
In Loco	1.308	1,07	495	37,84	600	45,87

Fonte: Autor. *₍₁₎ (Exemplares) e *₍₂₎ (Exemplares Não-conformes).

Tabela 16 - Não-conformidade total do concreto para as classes de C30 a C50.

Modalidade de Preparo	Geral		NBR 12655/2015		Critério de Fusco	
	Quant. ₍₁₎	% ₍₁₎	Quant. ₍₂₎	% ₍₂₎	Quant. ₍₂₎	% ₍₂₎
Total	108.623	100,00	23.298	21,45	33.468	30,81
Usinado	107.407	98,88	22.823	21,25	32.896	30,63
In Loco	1.216	1,12	475	39,06	572	47,04

Fonte: Autor. *₍₁₎ (Exemplares) e *₍₂₎ (Exemplares Não-conformes).

De acordo com o critério da NBR 12655/2015, o percentual de **não-conformidade**

total dos concretos foi de 20,21% e dos concretos usinados de 20,02%, isso equivale dizer que de cada vinte caminhões-betoneiras recebidos nas obras, quatro deles tem sua resistência estimada aquém da resistência especificada. Em outras palavras, a quantidade de não-conformidade total do concreto usinado encontrado na pesquisa, estar quase 400% acima da quantidade máxima de não-conformidade permitida pela NBR 6118/2014.

Ao realizar a mesma avaliação utilizando-se do critério de Fusco, a **não-conformidade total do concreto passou a ser de 28,84%** e para os concretos usinados de 28,66%, ou seja, quase seis caminhões-betoneiras não-conformes a cada vinte verificados, aproximadamente 600% superior a quantidade máxima permitida. Quando avaliados somente para as classes de resistência de C30 a C50, os respectivos percentuais de não-conformidade do concreto usinado ainda aumentam para 21,25% e para 30,63%.

Para os concretos preparados “in loco”, os percentuais de não-conformidade totais avaliados pelos dois critérios em questão, correspondem respectivamente a 37,84% e a 45,85%. Os mesmos percentuais aumentam para 39,06% e para 47,04% quando analisados exclusivamente para as classes de resistência de C30 a C50. Esses percentuais indicam que a cada vinte betonadas de concreto produzidas pelas obras, de sete a nove betonadas não atingem a resistência especificada. Em comparação com a quantidade máxima de não-conformidade estabelecida na norma, isso representa que a não-conformidade do concreto “in loco” estar de 700% a 900% acima desta quantidade.

4.3.2. Comparação entre a Resistência Estimada e a Tensão Resistente de Cálculo

Na **Tabela 17** todos os valores das resistências à compressão dos 122.810 exemplares são avaliados não mais quanto à observância do limite 5% de resultados abaixo da resistência especificada, mas para o potencial que cada resistência individual tem em se encontrar aquém do valor máximo que a Tensão Resistente de Cálculo (σ_{cd}) pode alcançar, isto é, que a resistência estimada não atinja 60,7% da resistência especificada.

Tabela 17 - Exemplos abaixo da máxima tensão resistente de cálculo ($f_{ck,est} < \sigma_{cd}$).

Modalidade de Preparo	Geral		NBR 12655/2015		Critério de Fusco	
	Quant. (1)	% (1)	Quant. (2)	% (2)	Quant. (2)	% (2)
Total	122.810	100,00	436	3,6	564	4,6
Usinado	121.502	98,93	383	3,2	497	4,1
In Loco	1.308	1,07	53	40,5	67	51,2

Fonte: Autor. $^{*(1)}$ (Exemplares) e $^{*(2)}$ (Exemplares $f_{ck,est} < \sigma_{cd,máximo}$).

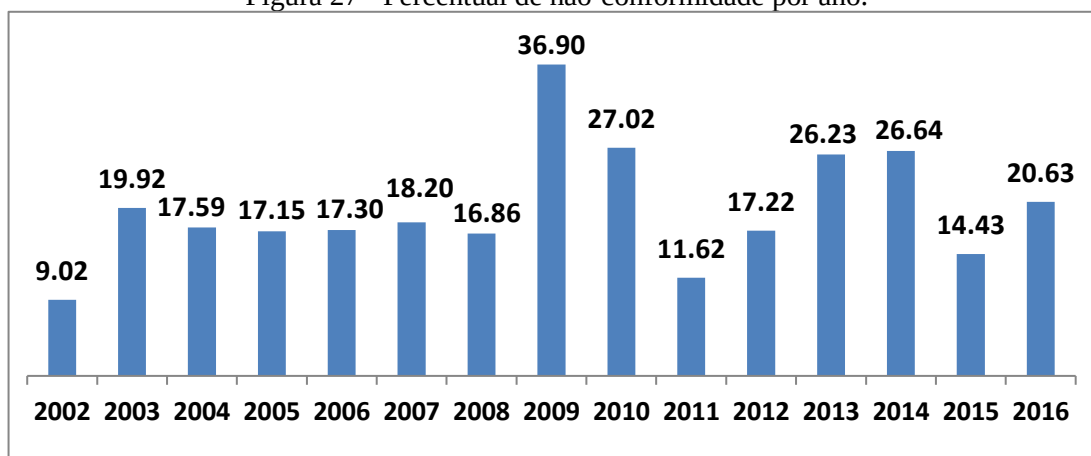
Analisando os valores das resistências estimadas dos concretos usinados pelo critério NBR 12655/2015 e pelo critério de Fusco, observou-se respectivamente que 3,2% e 4,1% desses valores ficaram 60,7% abaixo da sua resistência especificada. Isto é, a depender do critério de julgamento do concreto, de três a quatro caminhões-betoneiras a cada mil entregues nas obras, tem seus os valores de resistências estimadas tão inferiores que propiciam que as condições analíticas de segurança, estabelecidas na NBR 6118/2014, sejam desrespeitadas.

Da mesma forma, ao analisar os valores das resistências estimadas obtidos pelos concretos preparados “in loco”, verifica-se que de cada mil betonadas produzidas, de quarenta a cinquenta betonadas não atingem 60,7% das suas resistências especificadas. Potencializando em 1.265% o risco de não atender as condições analíticas de segurança quando comparado ao concreto usinado.

4.3.3. Não-Conformidades Anuais e mensais

Para realizar as análises temporais das conformidades de todos os concretos, os 122.810 exemplares foram separados inicialmente pelo ano e posteriormente pelo mês em que cada exemplar foi produzido. Nas **Figura 27** e **Figura 28** são apresentados respectivamente os percentuais de não-conformidades anuais e mensais dos concretos, segundo o critério estabelecido pela NBR 12566/2015. Doravante, todas as demais análises aqui apresentadas foram realizadas unicamente por esse critério de julgamento.

Figura 27 - Percentual de não-conformidade por ano.



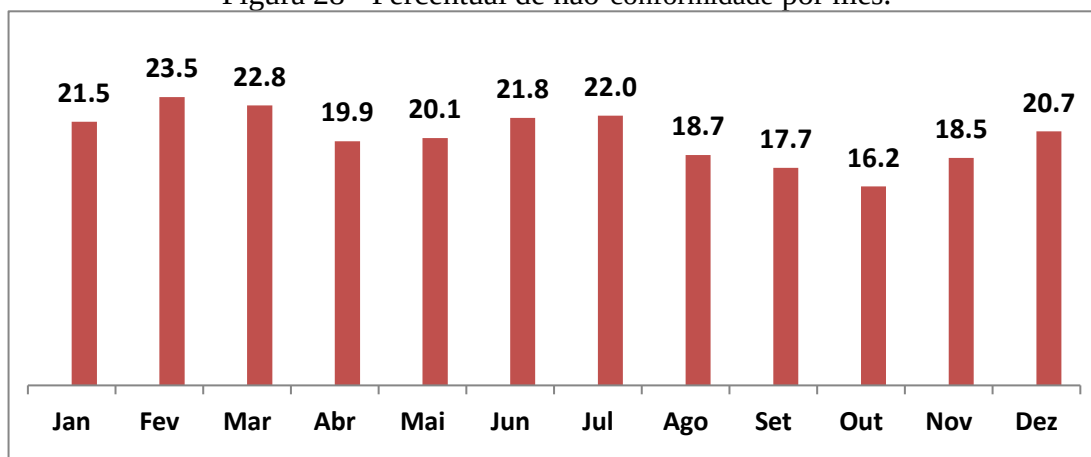
Fonte: Autor. Valores em %.

Observa-se que o ano de 2009 novamente separa duas situações distintas de não-conformidades, uma que vai de 2002 a 2008 e outra que vai de 2009 a 2016. Excluindo-se das análises o percentual do ano de 2002, por ser ele o único ano com quantidade inferior a 3.000 exemplares, os percentuais anuais de não-conformidades do primeiro intervalo (2002-2008) se apresentam mais uniformemente distribuídos, com percentual médio de 17,84% e desvio-padrão de 1,12%. No segundo intervalo (2009-2016) verifica-se um aumento no percentual anual médio de não-conformidade para 22,59% e uma maior variabilidade anual expressa pelo desvio-padrão padrão de 8,23%.

Numa primeira avaliação, percebe-se que o percentual de não-conformidade do ano de 2009 destoa bastante dos demais, principalmente ao compará-lo com seus antecessores, se apresentando quase como um *outlier* e denotando até alguma possível incongruência na análise realizada. As prováveis causas que exarcebaram ainda mais a não-conformidade dos concretos produzidos no ano de 2009, são apresentadas por Chiara (2010) em matéria publicada no jornal O Estado de São Paulo.

A reportagem relata que os fabricantes de cimentos não estavam preparados para atender o aumento da demanda, devido ao “Boom da Construção”, principalmente nas regiões Norte e Nordeste. A matéria relata que esse aumento da demanda provocou uma escassez do produto e consequentemente uma elevação do preço do cimento em todo país. E que, para poder abastecer a região Nordeste, forçou um grande fabricante nacional a importar cimento do Vietnã, que na época era o único país com disponibilidade de fornecer cimento ensacado para atender o consumo nacional.

Figura 28 - Percentual de não-conformidade por mês.

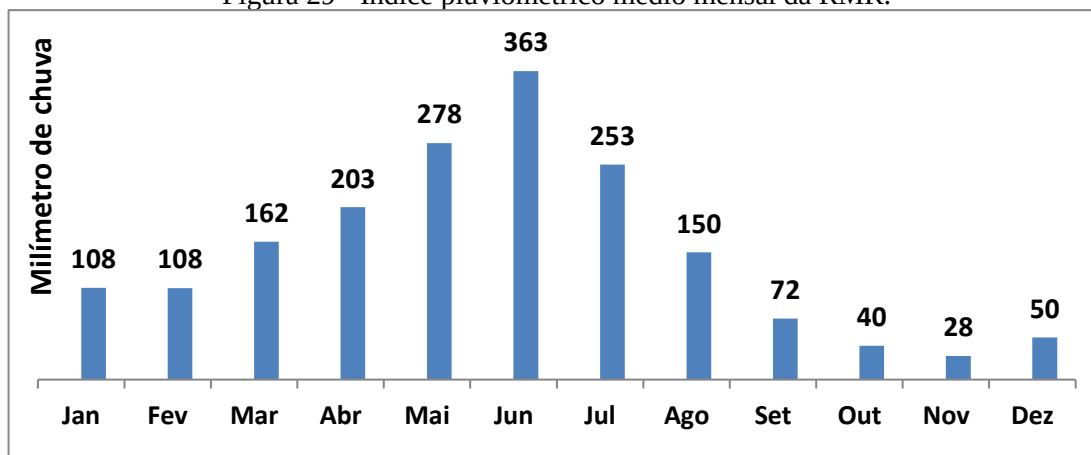


Fonte: Autor. Valores em %.

As porcentagens das quantidades mensais de concreto se encontram bem distribuídas ao longo dos meses, com desvio-padrão padrão de 0,74%, evidenciando uma produção constante. O percentual de não-conformidade oscila no decorrer do ano com desvio-padrão padrão de 2,19% e alcança seus máximos entre os meses de Dezembro a Março e entre os meses de Junho e Julho.

Na **Figura 29** se encontram as médias mensais das precipitações pluviométricas da Região Metropolitana do Recife, disponibilizadas pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) exclusivamente dentro do período da pesquisa, de 01/01/2002 até 31/12/2016. A **Tabela 18** apresenta-se o cruzamento entre os percentuais mensais de não-conformidade e as precipitações pluviométricas mensais, objetivando verificar se as quantidades de chuvas podem influenciar na conformidade do concreto.

Figura 29 - Índice pluviométrico médio mensal da RMR.



Fonte: APAC, 2018. Período de 01.01.2002 a 31.12.2016. Valores em milímetros de chuva (mm).

Tabela 18 - Não-conformidade por precipitação pluviométrica.

Precipitação Máxima (mm)	50	100	150	200	250	300	350	400
Precipitação Média (mm)	34	61	108	156	203	226	-	363
Não-conformidade Média (%)	17,4	19,2	22,5	20,8	19,9	21,0	-	21,8

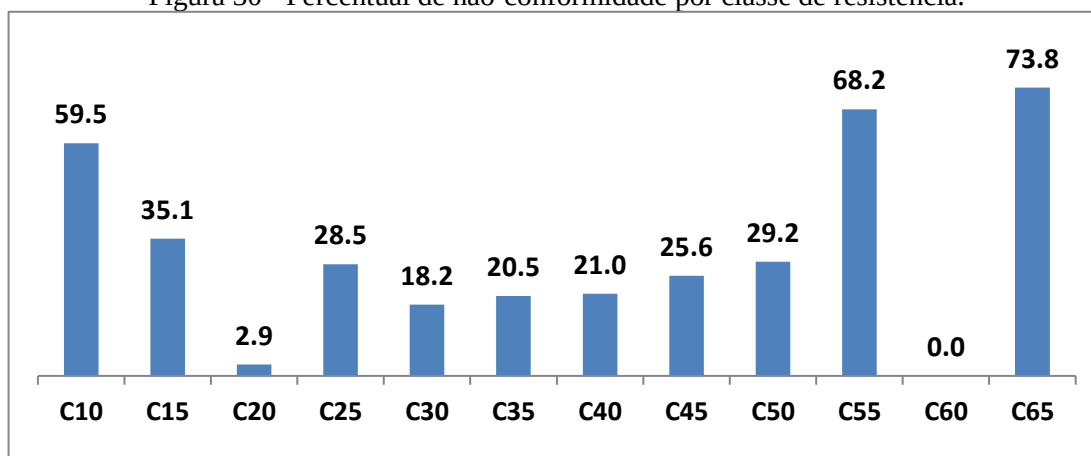
Fonte: Autor; APAC, 2018. Valores em milímetros de chuva (mm) e % (Não-conformidade).

Na **Tabela 18** os meses foram agrupados em intervalos de classes de acordo com suas precipitações pluviométricas máximas e em cada intervalo foi registrado as médias das suas precipitações mensais e as médias dos seus percentuais mensais de não-conformidade. Ao observar linearmente os intervalos classes, verifica-se que em cinco dos setes intervalos (50, 100, 200, 300 e 400; 71,4%), o percentual de não-conformidade aumenta gradativamente com o aumento do índice de chuvas, todavia, essa tendência não se propaga em dois dos sete intervalos de classes (150, 250; 28,6%) que se posicionam como pontos fora da reta. Pode-se caracterizar uma tendência do percentual de não-conformidade em aumentar com o aumento da precipitação pluviométrica mensal, porém longe de ser uma regra, uma vez que ela não se configurou em todos os intervalos.

4.3.4. Não-Conformidade por Classe de Resistência

Na **Figura 30** são apresentados os percentuais de não-conformidades obtidos por cada uma das doze classes de resistências pesquisadas. Por razões anteriormente expostas, excluem-se dessas observações as classes de resistências C10, C15, C55, C60 e C65 que representam 0,40% do total dos exemplares.

Figura 30 - Percentual de não-conformidade por classe de resistência.



Fonte: Autor. Valores em %.

Contemplando-se as classes de resistência C20 e C25, 11,15% do total de exemplares, observa-se uma discrepância entre os percentuais de não-conformidades dessas duas classes adjacentes. A classe C20 apresenta o menor percentual de não-conformidade entre todas as classes (2,9%) e a única que poderia ser classificada como conforme ($\leq 5\%$). A classe C25 apresenta o segundo mais elevado percentual de não-conformidade (28,5%), o que representa um potencial de rejeição quase dez vezes maior em comparação aos concretos da classe C20.

Analisando os resultados das classes de C30 a C50, 88,45% do total de exemplares, observa-se claramente que os percentuais de não-conformidades aumentam à medida que se aumentam as classes de resistências. Subdividindo-se essa faixa de classes em dois blocos, sendo o primeiro formado por C30, C35 e C40 e o segundo por C45 e C50, percebe-se dois patamares de não-conformidades. O primeiro com percentual médio de não-conformidade de 20,20% e o segundo de 27,24%, evidenciando uma probabilidade de rejeição dos concretos das classes C45 e C50, 34,9% maior do que para os concretos das classes C30, C35 e C40.

4.4. Parâmetros Estatísticos dos Concretos por Classe de Resistência

Visando-se evitar distorções nos resultados dos parâmetros estatísticos, não foram utilizados nessas análises todos os 122.810 exemplares. Todas as classes de resistência passaram por um tratamento estatístico prévio, para identificar e eliminar dos seus conjuntos de dados todos os seus respectivos *outliers*. Ao fim do processo, excluem-se os valores de 1.125 *outliers* (0,9%), restando para as análises 121.685 exemplares (99,1%).

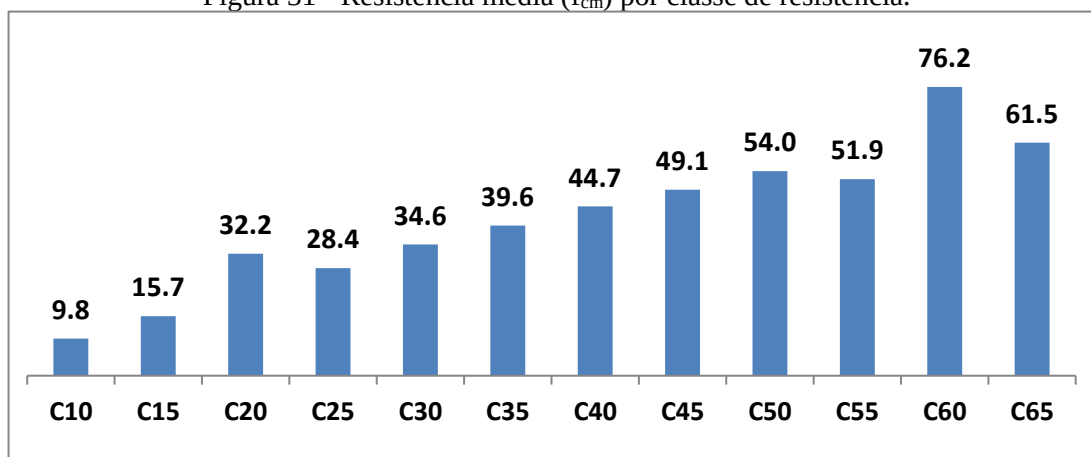
Na **Figura 31**, **Figura 32**, **Figura 33** e **Figura 34** são apresentadas as médias, os desvios-padrões, as resistências características estimadas e os coeficientes de variações para

cada uma das 12 classes de resistência da pesquisa, respectivamente calculadas através das equações **03**, **07**, **20** e **09**. As observações que se seguem, referem-se às classes de resistência de C20 até C50 (99,61% dos exemplares).

4.4.1. Média por Classe de Resistência

Analisando a **Figura 31** verifica-se que os valores das resistências médias superam os valores das respectivas resistências especificadas, fato decorrente do incremento de $1,645 \times S_d$ adicionado a própria resistência especificada para garantir o nível de significância de 5% na produção do concreto. Examinando-se ainda a **Figura 31**, observa-se que as resistências médias, a partir da classe de resistência C25 até a C50, crescem a uma taxa média de 5,1 MPa de uma classe para a outra, basicamente acompanhando a mesmas diferenças entre as resistências das classes.

Figura 31 - Resistência média (f_{cm}) por classe de resistência.



Fonte: Autor. Valores em MPa.

4.4.2. Desvio-padrão por Classe de Resistência

O desvio-padrão fornece condições para aferir o nível de precisão alcançada por uma determinada linha de produção, nesse caso, a produção de concreto. É, portanto esperado que independente da classe de resistência a ser produzida, a precisão do processo seja igual para todas, isto é, espera-se obter os mesmos desvios-padrões ou valores muito próximos entre todas as classes de resistência.

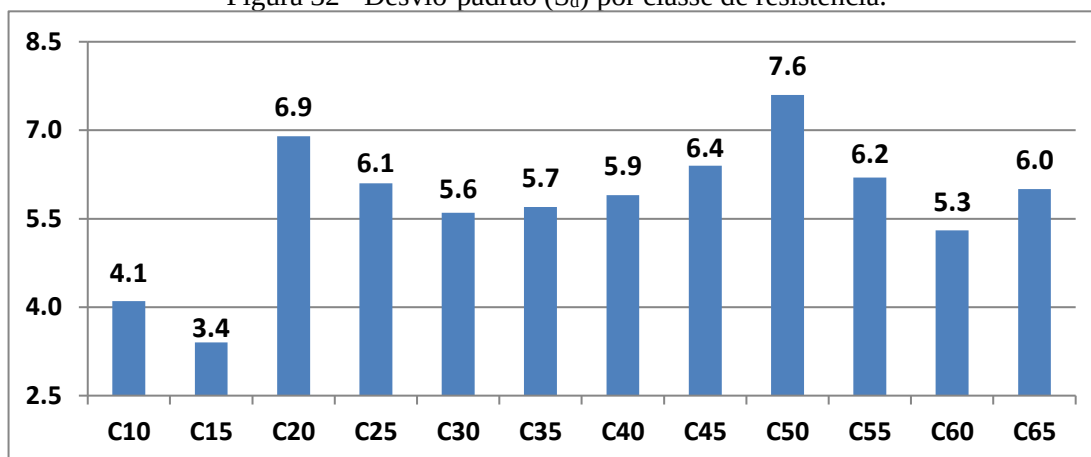
Na **Tabela 19** são apresentados os valores dos desvios-padrões iniciais a ser adotado em função das condições de preparo do concreto quanto ainda se desconhece o desvio-padrão do processo de produção (NBR 12655, 2015).

Tabela 19 - Desvio-padrão em função da condição de preparo do concreto.

	Condição de Preparo do Concreto	Desvio-padrão
A	Aplicável a todas as classes; cimento e agregados medidos em massa; água medida em massa ou volume e corrigida pela umidade dos agregados.	4,0 MPa
B	Aplicável às classes C10 a C20; cimento medido em massa; agregados em massa combinada com volume; água medida em volume.	5,5 MPa
C	Aplicável apenas as classes C10 e C15; cimento medido em massa; agregados e água medidos em volume; correção da umidade pelo Slump.	7,0 MPa

Fonte: NBR 12655, 2015.

Observando-se inicialmente os desvios-padrões das classes de resistência de C30 a C50 da **Figura 32**, cujo desvio-padrão médio vale 6,2 MPa, percebe-se que igualmente ao percentual de não-conformidade dessas classes, o desvio-padrão padrão também aumenta com o aumento da resistência especificada, condição essa não verificada nas demais classes de resistências. Continuando a análise do mencionado intervalo, notam-se dois patamares distintos de variações: um, de C30 a C40, com os valores dos desvios-padrões muito próximos entre si, evidenciando uma uniformidade de produção; e outro, de C45 a C50, com valores mais elevados e esparsos denotando descontrole entre seus preparos.

Figura 32 - Desvio-padrão (S_d) por classe de resistência.

Fonte: Autor. Valores em MPa.

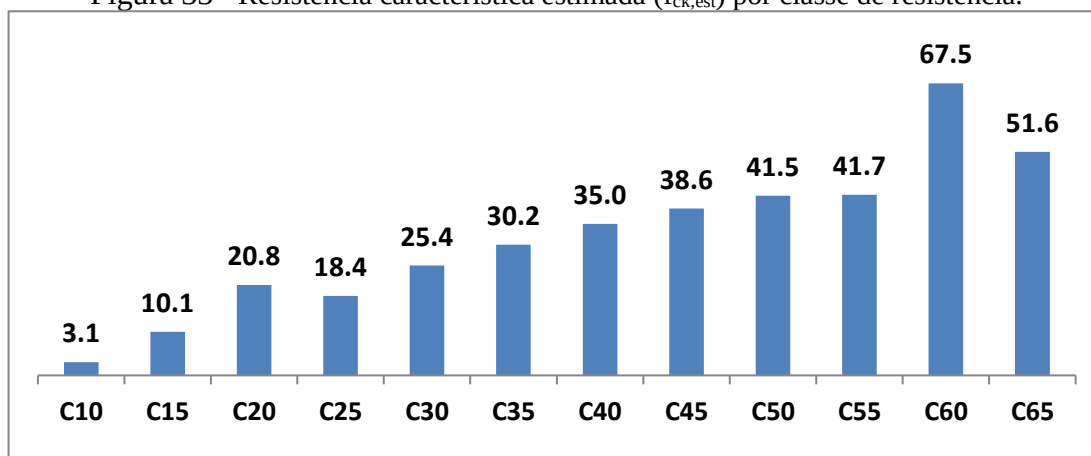
Analisando as classes de resistência de C20 até C50 (99,61% dos exemplares), constata-se que os desvios-padrões de todas elas se encontram acima da condição de preparo B e a classe C50 ainda ultrapassa o limite da condição de preparo C, onde os desvios-padrões

esperados para concretos estruturais deveriam estar próximos a condição de preparo A.

4.4.3. Resistência Característica Estimada por Classe de Resistência

Analisando a **Figura 33**, com exceção das classes C20 e C60, verifica-se que as todas as demais classes encontram-se em não-conformidade, ou seja, os valores das suas resistências características estimadas não atingiram os valores das suas respectivas resistências especificadas. Observando-se as classes de C30 a C55, percebe-se que os valores das diferenças entre as resistências características e as resistências especificadas aumentam progressivamente com o aumento das classes de resistência, isto é, a resistência característica tem um crescimento inferior ao crescimento da sua resistência especificada.

Figura 33 - Resistência característica estimada ($f_{ck,est}$) por classe de resistência.



Fonte: Autor. Valores em MPa.

De acordo com os valores encontrados nas resistências médias (**Figura 31**), seria lógico avaliar que os desvios-padrões das classes de C25 a C50 estivessem variando de 2,1 MPa a 2,9 MPa (valores calculados através da equação **18**), fato não corroborado pelo exposto na **Figura 32**. Nela, pode-se verificar que os desvios-padrões dessas classes de resistências, na realidade são quase duas vezes e meia superiores, variando de 5,6 MPa a 7,6 MPa, caracterizando que os valores das resistências de dosagens ficaram muito aquém do mínimo necessário para atender o nível de significância de 5% determinado em norma. Tal observação pode ser comprovada quando se avaliam as resistências características estimadas encontradas para as mesmas classes de resistência de C25 a C50 (**Figura 33**), onde seus valores são inferiores as suas resistências especificadas.

Ao realizar a mesma análise exclusivamente para a classe de resistência C20, percebe-se que apesar dela apresentar um elevado desvio-padrão (6,9 MPa), a sua resistência média

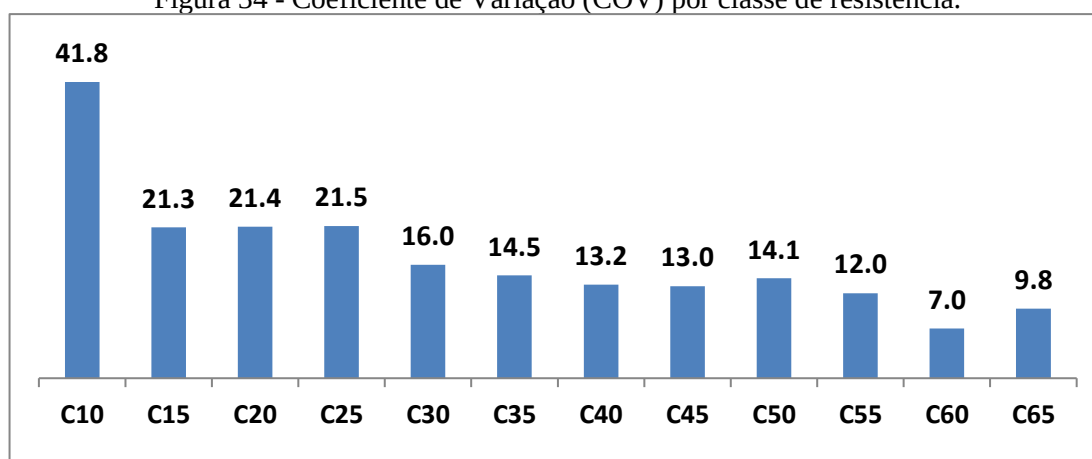
também elevada (32,2 MPa) demonstra perfeitamente a observância do incremento de $1,645 \times S_d$ na sua resistência especificada. A consequência dessa observância se reflete no valor de sua resistência característica estimada (20,8 MPa), tornando-a única classe de resistência com percentual de não-conformidade (2,9%) menor ao máximo permitido pela NBR 6118/2014.

4.4.4. Coeficiente de Variação por Classe de Resistência

O coeficiente de variação de uma determinada série de dados é obtido dividindo-se o seu desvio-padrão pela sua média. Numa produção bem controlada de concreto, os desvios-padrões das diversas classes de resistência têm a propensão de se uniformizarem entorno de um valor aproximado. Diferentemente das médias das classes de resistência que têm a predisposição de aumentarem de valores com o aumento das suas resistências especificadas.

Então, numa produção bem controlada de concreto, onde o valor do numerador (desvio-padrão) pouco se modifica e o valor do denominador (média) cresce com o aumento das classes de resistência, a tendência natural do coeficiente de variação é em diminuir de valor com o aumento das classes de resistência. Observando-se a **Figura 34**, percebe-se que de fato existe essa tendência, porém não se pode tomá-la como regra, visto que, as variabilidades do processo de produção do concreto não permitem que tal conjectura seja verificada em todas as classes de resistência.

Figura 34 - Coeficiente de Variação (COV) por classe de resistência.



Fonte: Autor. Valores em %.

Classificando-se as amplitudes dos coeficientes de variações das classes de resistência de C20 a C50, de acordo com a **Tabela 3**, verifica-se que as três menores classes de

resistência (C20, C25 e C30) estão na faixa da média dispersão dos dados, enquanto as quatro maiores classes de resistência (C35, C40, C45 e C50) estão na faixa da baixa dispersão.

4.4.5. Simulação via Métodos Monte Carlo das Classes de C10 a C65

Os denominados Métodos Monte Carlo são geradores de números aleatórios equiprováveis de uma determinada variável aleatória. Tem como objetivo simular ou reproduzir uma população de dados para estudar suas propriedades dentro de um modelo controlado. Os antigos geradores desses números aleatórios eram os dados e as roletas dos cassinos, daí a origem do seu nome em referência ao famoso cassino do principado de Monte Carlo. Atualmente, a geração desses números aleatórios é realizada por processos matemáticos simulados em computadores (OLIVEIRA, 2016; BUSSAB; MORETTIN, 2017).

Para aprofundar o estudo dos parâmetros estatísticos da massa de dados dos concretos pesquisados, foram geradas em programa matemático apropriado, via Métodos Monte Carlo, 7 amostras de “n” pares de valores ($n = 20; 50; 10^2; 10^3; 10^4; 10^5; 10^6$). Os valores das variáveis aleatórias de cada par (X_i e Y_i) simulam as resistências à compressão aos 28 dias de dois exemplares retirados de cada um dos “n” exemplares de concreto para as classes de resistência de C10 a C65. Os parâmetros de entrada das simulações para cada diferente classe de resistência, médias e desvios-padrões, foram extraídos respectivamente da **Figura 31** e **Figura 32**. Finalizadas as simulações de cada uma das 7 amostras, a obtenção dos parâmetros estatísticos foi produzida para 4 diferentes critérios estimativos, nomeados aqui pelas letras Z, S, U e W (OLIVEIRA, 2018).

O primeiro critério apresentado (Z) é referencial para todos os outros critérios é o mesmo recomendado pela NBR 12655/2015 e utilizado nessa pesquisa, que adota apenas o maior valor dentre dois corpos-de-prova (exemplar) para julgar uma betonada de concreto. O segundo critério (S) é o que se aproxima um pouco mais da recomendação da ACI-318, adotando uma média entre os dois exemplares da amostra para determinar um resultado individual para o exemplar de concreto (SOUZA; BITTENCOURT, 2003). No terceiro critério (U) adotou-se todos os dois valores de um exemplar, tanto o maior valor quando o menor valor, duplicando assim o tamanho da amostra formada para cada “n”. Para o quarto e último critério (W) adotou-se a pior situação, ou seja, apenas o menor valor dentre os dois corpos-de-prova do exemplar (OLIVEIRA, 2018).

Os resultados, para cada classe de resistência, dos parâmetros estatísticos (média, desvio-padrão, coeficiente de variação e $f_{ck,est}$) e da redução das suas resistências características, simulados conforme os critérios estimativos, são apresentados individualmente na **Tabela 20**.

Tabela 20 - Resultados dos parâmetros estatísticos por critérios estimativos.

Classe de Resistência	Critério Estimativo	X_m (MPa)	S_d (MPa)	COV (%)	$f_{ck,est}$ (MPa)	Redução do $f_{ck,est}$	
						Absoluto	%
C10	Z (maior)	11,87	3,32	28,00	6,41	1,000	-
	S (média)	10,04	2,64	26,30	5,70	0,889	11,08
	U (todos)	10,04	3,59	35,70	4,14	0,646	35,41
	W (menor)	8,21	2,84	34,60	3,54	0,552	44,77
C15	Z (maior)	17,70	2,56	14,40	13,50	1,000	-
	S (média)	15,64	2,12	13,60	12,15	0,900	10,00
	U (todos)	15,64	3,39	21,70	10,07	0,746	25,41
	W (menor)	13,58	2,82	20,80	8,94	0,662	33,78
C20	Z (maior)	36,26	5,19	14,30	27,73	1,000	-
	S (média)	32,08	4,31	13,40	24,99	0,901	9,88
	U (todos)	32,08	6,87	21,40	20,77	0,749	25,10
	W (menor)	27,90	5,73	20,50	18,48	0,666	33,36
C25	Z (maior)	31,99	4,59	14,30	24,45	1,000	-
	S (média)	28,30	3,81	13,50	22,02	0,901	9,94
	U (todos)	28,30	6,08	21,50	18,30	0,748	25,15
	W (menor)	24,60	5,06	20,60	16,27	0,665	33,46
C30	Z (maior)	37,90	4,21	11,10	30,97	1,000	-
	S (média)	34,50	3,50	10,10	28,75	0,928	7,17
	U (todos)	34,50	5,58	16,20	25,32	0,818	18,24
	W (menor)	31,11	4,65	14,90	23,47	0,758	24,22
C35	Z (maior)	42,85	4,28	10,00	35,90	1,000	-
	S (média)	39,50	3,56	9,00	33,64	0,937	6,30
	U (todos)	39,50	5,68	14,40	30,16	0,840	15,99
	W (menor)	36,05	4,73	13,10	28,26	0,787	21,28

Continua.

Tabela 20 - Resultados dos parâmetros estatísticos por critérios estimativos. Continuação.

Classe de Resistência	Critério Estimativo	X_m (MPa)	S_d (MPa)	COV (%)	$f_{ck,est}$ (MPa)	Redução do $f_{ck,est}$	
						Absoluto	%
C40	Z (maior)	48,17	4,44	9,20	40,88	1,000	-
	S (média)	44,60	3,69	8,30	38,53	0,943	5,75
	U (todos)	44,60	5,88	13,20	34,93	0,854	14,55
	W (menor)	41,03	4,90	11,90	32,97	0,807	19,35
C45	Z (maior)	52,87	4,81	9,10	44,95	1,000	-
	S (média)	48,99	4,00	8,20	42,41	0,943	5,65
	U (todos)	48,99	6,38	13,00	38,50	0,857	14,35
	W (menor)	45,11	5,31	11,80	36,37	0,809	19,09
C50	Z (maior)	58,47	5,71	9,80	49,07	1,000	-
	S (média)	53,87	4,75	8,80	46,06	0,939	6,13
	U (todos)	53,87	7,57	14,10	41,41	0,844	15,61
	W (menor)	49,27	6,31	12,80	38,89	0,793	20,75
C55	Z (maior)	55,55	4,66	8,40	47,88	1,000	-
	S (média)	51,79	3,87	7,50	45,42	0,949	5,14
	U (todos)	51,79	6,18	11,90	41,63	0,869	13,05
	W (menor)	48,04	5,15	10,70	39,57	0,826	17,36
C60	Z (maior)	79,32	3,98	5,00	72,76	1,000	-
	S (média)	76,11	3,31	4,40	70,66	0,971	2,89
	U (todos)	76,11	5,28	6,90	67,42	0,927	7,34
	W (menor)	72,90	4,40	6,00	65,66	0,902	9,76
C65	Z (maior)	65,03	4,51	6,90	57,61	1,000	-
	S (média)	61,40	3,75	6,10	55,23	0,959	4,13
	U (todos)	61,40	5,98	9,70	51,56	0,895	10,50
	W (menor)	57,76	4,98	8,60	49,57	0,860	13,96

Fonte: Autor; Oliveira, (2018). Resultados simulados para $n = 10^6$ amostras (2×10^6 valores).

Ao analisar os resultados dos $f_{ck,est}$ dos quatro critérios simulados (**Tabela 20**), como era lógico de se esperar, percebe-se que o critério do maior valor (Z) ou o critério adotado

pela NBR 12655/2015, proporciona a resistência característica mais elevada. Tomando como referência o valor característico produzido pelo critério Z, pôde-se calcular o quanto a adoção de um dos demais critérios reduz a estimativa da resistência característica de um mesmo concreto. Na **Tabela 21** são apresentados apenas os valores referentes à redução do $f_{ck,est}$, de forma total (todas as classes) e agrupados em intervalos de classes.

Tabela 21 - Redução do $f_{ck,est}$ para os critérios S, U e W em relação ao critério padrão Z.

Classe de Resistência	Critério Estimativo	X_m	S_d	COV (%)	%
C10 a C25	S (média)	0,93	0,01	0,65	10,23
	U (todos)	0,72	0,05	7,04	27,78
	W (menor)	0,64	0,06	8,83	36,38
C30 a C50	S (média)	0,94	0,01	0,66	6,20
	U (todos)	0,84	0,02	1,83	15,74
	W (menor)	0,79	0,02	2,60	20,92
C55 a C65	S (média)	0,96	0,01	1,15	4,03
	U (todos)	0,90	0,03	3,24	10,03
	W (menor)	0,86	0,04	4,41	13,73
C10 a C65 (Todas as Classes)	S (média)	0,93	0,03	2,83	7,01
	U (todos)	0,82	0,08	9,69	18,52
	W (menor)	0,76	0,10	13,30	24,26

Fonte: Autor; Oliveira, (2018). Resultados simulados para $n = 10^6$ amostras (2×10^6 valores).

Pela **Tabela 21**, verifica-se que o critério S, único a utilizar um parâmetro estatístico (média dos dois valores dos exemplares) para estimar a resistência da amostra, produz uma **redução média total de 7,01%** na resistência característica em comparação ao critério da NBR 12655/2015. Da mesma forma, os critérios U e W reduzem ainda mais as suas estimativas da resistência característica, respectivamente em **18,51%** e **24,26%**.

Aplicando individualmente, para cada um dos 122.810 exemplares da pesquisa, os respectivos fatores de redução do $f_{ck,est}$ das classes de resistência (**Tabela 20**), pôde-se calcular os percentuais de não-conformidade total dos concretos também para os critérios estimativos S, U e W (**Tabela 22**).

Tabela 22 - Não-conformidade das classes de C10 a C65 por critérios estimativos.

Classe de Resistência	Quantidade de Exemplar	% Não-Conformidade por Critério Estimativo			
		Z (maior)	S (média)	U (todos)	W (menor)
C10	121	59,50	75,21	85,95	93,39
C15	111	35,14	52,25	77,48	81,98
C20	10.434	2,90	6,29	21,84	39,86
C25	3.262	28,54	47,70	79,31	90,04
C30	19.789	18,23	34,24	65,94	81,87
C35	34.003	20,47	34,49	63,76	79,84
C40	35.618	21,05	35,89	65,25	79,65
C45	10.501	25,62	41,39	70,61	84,61
C50	8.718	29,20	46,31	76,21	87,76
C55	214	68,22	84,11	97,20	98,60
C60	3	0,00	0,00	0,00	0,00
C65	42	73,81	88,10	100,00	100,00
Total	122.810	20,21	34,40	62,97	78,01

Fonte: Autor; Oliveira (2018).

Analisando a **Tabela 22**, verifica-se que o percentual de não-conformidade total de 20,21% (critério da NBR 12655/2015) sobe para **34,40%** pelo critério S, ou seja, quando se adota como critério estimativo a média entre os dois exemplares, o percentual de não-conformidade aumenta em 70,2% em relação ao critério Z, do maior valor. Replicando o mesmo raciocínio aos critérios U e W, percebe-se que os seus respectivos percentuais de não-conformidade são **62,97% e 78,01%**, isso é, 211,6% e 330,5% maiores do que o percentual de não-conformidade produzida pelo critério Z (maior entre os dois valores).

4.5. Comparativo dos Resultados Encontrados com de Outros Trabalhos

No intuito de realizar uma análise comparativa dos resultados encontrados nessa pesquisa, com os possíveis resultados encontrados por outros pesquisadores em trabalhos com características aproximadas, encontrou-se na literatura a dissertação de mestrado de Wagner Carvalho Santiago, apresentada em 2011 à Escola de Engenharia de São Carlos - SP: “ESTUDO DA (NÃO-) CONFORMIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS NO BRASIL

E SUA INFLUÊNCIA NA CONFIABILIDADE ESTRUTURAL”.

A pesquisa nacional realizada por Santiago (2011) abrangeu 10 unidades da federação (37%), sendo 5 estados da região Nordeste, o Distrito Federal no Centro-Oeste, 3 estados do Sudeste, um estado na região Sul e nenhum estado na região Norte do país. No total, a sua **pesquisa nacional analisou 6.561 exemplares** de concretos usinados, distribuídos em quatro classes de resistência do grupo I (C20, C30, C40 e C50). Apesar de informar a procedência dos dados utilizados, o mesmo não informou se os resultados foram obtidos por laboratórios pertencentes à RBLE e nem indicou a data em que os concretos foram produzidos ou o tipo de controle adotado.

Na parte final da sua dissertação, Santiago (2011) propõe três sugestões para trabalhos futuros: coletar dados em outras unidades federativas não pesquisadas; englobar outras classes de resistência não contempladas; e incluir na pesquisa concretos preparados “in loco”. Mesmo, sem ser a intenção inicial dessa dissertação, verificou-se ao final da pesquisa que ela atendeu a todas três sugestões realizadas por Santiago.

4.5.1. Comparativo das Não-Conformidades por Classes de Resistência

Na **Tabela 23** são apresentadas as quantidades individuais dos exemplares coletados por cada classe de resistência e seus respectivos percentuais de não-conformidades, separadamente encontrados pelas duas pesquisas.

Analisando as classes de resistência de C20 a C50 da **Tabela 23**, percebem-se algumas semelhanças entre os resultados das duas pesquisas: os baixíssimos percentuais de não-conformidades das classes C20 em comparação com as demais classes de resistência; a classe de resistência C40 é o concreto mais especificado pelos projetistas; e a tendência de aumento dos percentuais de não-conformidade dos concretos com o aumento das classes de resistência.

Tabela 23 - Comparação dos % de não-conformidades por classe de resistência.

Classe de Resistência	Quantidade de Exemplar		% de Não Conformidade	
	Santiago	Autor	Santiago	Autor
C10	-	121	-	59,5
C15	-	111	-	35,1
C20	1.255	10.434	1,0	2,9
C25	-	3.262	-	28,5
C30	1.233	19.783	9,0	18,2
C35	-	34.003	-	20,5
C40	3.925	35.618	28,0	21,0
C45	-	10.501	-	25,6
C50	148	8.718	84,0	29,2
C55	-	214	-	68,2
C60	-	3	-	0,0
C65	-	42	-	73,8
Total	6.561	122.810		

Fonte: Autor; Santiago (2011). Nos percentuais do Autor desprezaram-se os *Outliers*.

4.5.2. Comparativo das Não-Conformidades Totais dos Concretos

Na **Tabela 24** são apresentadas as quantidades totais dos exemplares coletados pelas duas pesquisas e seus respectivos percentuais totais de não-conformidades. Os resultados foram analisados de três modos diferentes, de forma que as classes de resistência e as modalidades de preparo encontradas na RMR pudessem se adequar as encontradas pela pesquisa nacional.

A primeira análise foi realizada apenas com os resultados dos concretos das quatro classes de resistência e da única modalidade de preparo encontradas pela pesquisa nacional. A segunda comparação procedeu-se da mesma forma, exceto pela retirada das análises dos exemplares das classes C20. A terceira comparação realizou-se com todas as classes e modalidades de preparo encontradas pela pesquisa da RMR.

Tabela 24 - Comparação dos % de não-conformidades totais dos concretos.

Preparo e Classe de Resistência	Quantidade de Exemplar		% de Não Conformidade	
	Santiago	Autor	Santiago	Autor
Usinado C20, C30, C40 e C50	6.561	73.780	20,53	18,53
Usinado C30, C40 e C50	5.306	63.393	25,14	21,11
Usinado e "In loco" C10 à C65	6.561	122.810	20,53	20,21

Fonte: Autor; Santiago (2011).

Na primeira análise, percebe-se que o percentual total de não-conformidade dos concretos usinados produzidos no Brasil é 20,53%, ou seja, a cada 20 caminhões-betoneiras entregues nas obras brasileiras, pouco mais de 4 caminhões-betoneiras tem os valores das resistências estimadas de seus concretos inferiores aos respectivos valores das suas resistências especificadas. Esses mesmos parâmetros, quando avaliados para os concretos da RMR, apresentam percentual de não-conformidade de 18,53%, o que representa pouco menos de 4 caminhões-betoneiras não-conforme a cada vinte recebidos, ou 9,70% a menos que o percentual nacional.

Pela segunda análise, verifica-se um aumento no percentual de não-conformidade da pesquisa nacional para 25,14%. Isso significa que, a cada 20 caminhões-betoneiras entregues nas obras brasileiras com concretos das classes de resistência C30, C40 e C50, 5 caminhões-betoneiras têm as resistências estimadas de seus concretos inicialmente rejeitadas, 500% maior do que a quantidade máxima permitida pela NBR 6118/2014. Na RMR, esses mesmos concretos aparecem com não-conformidade de 21,11%, percentual 16,00% menos “defeituosos” que os concretos nacionais.

A terceira análise engloba todas as classes e modalidades de preparo encontradas pelas duas pesquisas. Observar-se que os dois percentuais de não-conformidades, o do Brasil e o da RMR são praticamente iguais, respectivamente 20,53% e 20,21%. Significando que, ao analisar as produções totais dos concretos, encontra-se que de cada 5 exemplares avaliados 1 apresenta resistência estimada abaixo da resistência especificada, isso é, a quantidade encontrada de exemplares não-conformes, seja pela pesquisa nacional ou pela pesquisa da RMR, é 400% maior do que a quantidade máxima permitida pela NBR 6118/2014. Caracterizando num gravíssimo e sistêmico descumprimento das recomendações normativas para as produções de concretos.

4.5.3. Comparativo dos Parâmetros Estatísticos dos Concretos

Na **Tabela 25** são apresentadas as resistências médias, os desvios-padrões, as resistências características estimadas e os coeficientes de variações das duas pesquisas, respectivamente calculadas através das equações **03**, **07**, **20** e **09**. As análises comparativas referem-se a todos os exemplares das classes de resistência C20, C30, C40 e C50, que pela pesquisa nacional correspondem a 100% dos exemplares e das classes de resistência, e pela pesquisa da RMR correspondem a 60,7% dos exemplares e a 33,3% das classes de resistência.

Tabela 25 - Parâmetros estatísticos entre os trabalhos de Santiago e do Autor.

Classe de Resistência	f_{cm} (MPa)		S_d (MPa)		$f_{ck,est}$ (MPa)		COV (%)	
	Santiago	Autor	Santiago	Autor	Santiago	Autor	Santiago	Autor
C20	26,2	32,2	2,4	6,9	22,4	20,9	8,9	21,4
C30	33,9	34,6	3,7	5,6	27,8	25,5	10,8	16,0
C40	41,9	44,7	3,5	5,9	36,2	35,0	8,0	13,2
C50	47,2	54,0	2,9	7,6	42,4	41,5	6,2	14,1

Fonte: Autor; Santiago (2011). Nos parâmetros do Autor desprezaram-se os *Outliers*.

Essa diminuta quantidade de classes de resistência dificulta estabelecer alguma relação ou tendência entre os parâmetros estatísticos e as próprias classes de resistência, ainda mais quando se exclui das análises a classe C50, que pela pesquisa nacional só conta com 148 exemplares. Contudo, podem-se fazer algumas correlações entre os parâmetros estatísticos das duas pesquisas.

Pelos valores dos desvios-padrões e dos coeficientes de variações, percebe-se nitidamente uma menor variação dos dados coletados pela pesquisa nacional em relação aos coletados pela pesquisa da RMR, em média na ordem de 50%. As resistências médias das duas pesquisas, salvo as suas classes C20, não alcançaram valores condizentes com a correta utilização do incremento de $1,645 \times S_d$ nas resistências especificadas que a NBR 12655/2015 estabelece para as obtenções das resistências de dosagens.

Essa não observância aos procedimentos normativos, isto é, a utilização de desvios-padrões inferiores aos efetivamente avaliados, reflete indubitavelmente nos valores das resistências características estimadas obtidas por ambos os estudos. Afora as suas classes C20, todas as demais classes de resistências têm seus valores característicos aquém dos seus valores especificados, portanto, encontrando-se todas elas em não-conformidade.

4.6. Caracterização do Uso do Concreto nas Obras da RMR

A caracterização do uso do concreto pelas obras da região metropolitana do Recife tem a intenção de evidenciar algumas especificidades próprias desse setor construtivo.

4.6.1. Participação das Classes de Resistências na produção Anual de concreto

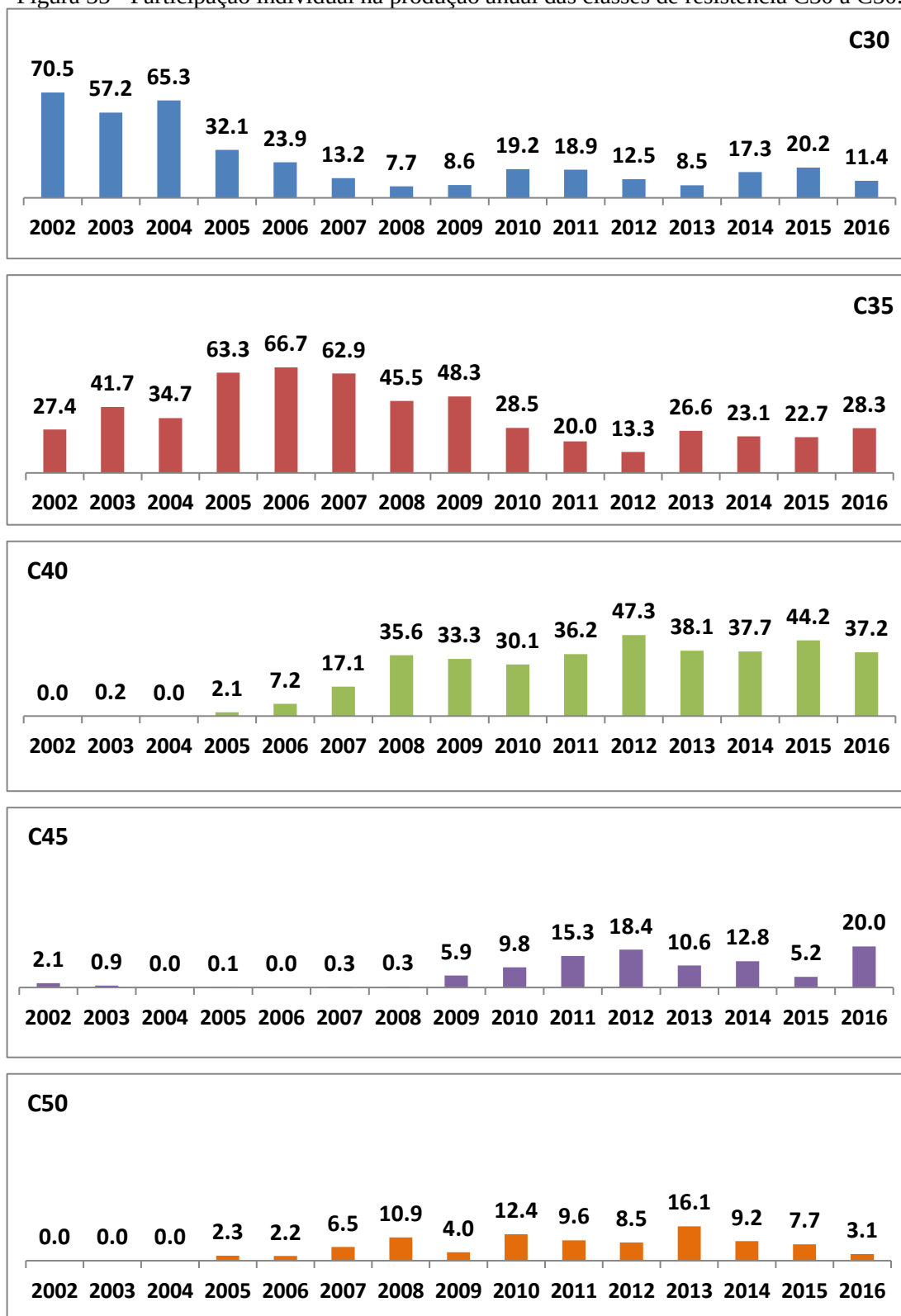
Nas **Figura 35** e **Figura 36** são apresentados apenas os percentuais de participação que cada uma das classes de resistências de C30 a C50 obtiveram nas produções anuais de concreto nos anos de 2002 a 2016, respectivamente de formas individual e coletiva. De forma individual, pela **Figura 35**, percebe-se que nos três primeiros anos da pesquisa (2002 a 2004) a classe de resistência C30 era o concreto estrutural mais especificado, com participação média de 65% dos concretos produzidos. A partir de 2005 sua especificação reduz quase 50% e continua a reduzir ao longo dos anos até atingir nos três últimos anos (2014 a 2016) uma média de 16,3% de participação.

A classe de resistência C35 que nos primeiros três anos (2002 a 2004) obteve média de participação de 34,6%, nos três anos seguintes (2005 a 2007) praticamente dobrou seu percentual de contribuição com média de 64,3%, sendo que de 2005 até 2009 passou a ser a classe de resistência mais especificada em projeto. A partir de 2008 seu percentual de participação começa a declinar e finalizando com média de 24,7% de contribuição nos últimos três anos da pesquisa (2014 a 2016).

A classe C40 com participação ínfima nos três primeiros anos da pesquisa (2002 a 2004) começou a se desenvolver nos três anos seguintes (2005 a 2007) com participação média de 8,8% no período. Dobrou seu percentual de contribuição para 35,6% no ano seguinte (2008), assumindo o posto de concreto mais especificado em 2010. Com participação média nos três últimos anos (2014 a 2016) de 39,7% da produção anual de concreto, a classe C40 continua sendo até então (2016), o concreto mais especificado pelos projetistas de estruturas.

Mesmo com percentuais de participações menores, as classes de resistência C45 e C50 tiveram evoluções semelhantes às obtidas pela classe C40. Nos dois primeiros triênios da pesquisa (2002 a 2004 e 2005 a 2007), obtiveram juntas nesses períodos, respectivamente 1,0% e 1,9% de participação. As suas efetivas participações iniciaram nos três anos seguintes (2008 a 2010), onde sua média conjunta de participação alcançou 7,2%. Nos três últimos anos da pesquisa (2014 a 2016) as classes de resistência C45 e C50, responderam em média por aproximadamente 10% da produção anual de concreto.

Figura 35 - Participação individual na produção anual das classes de resistência C30 a C50.



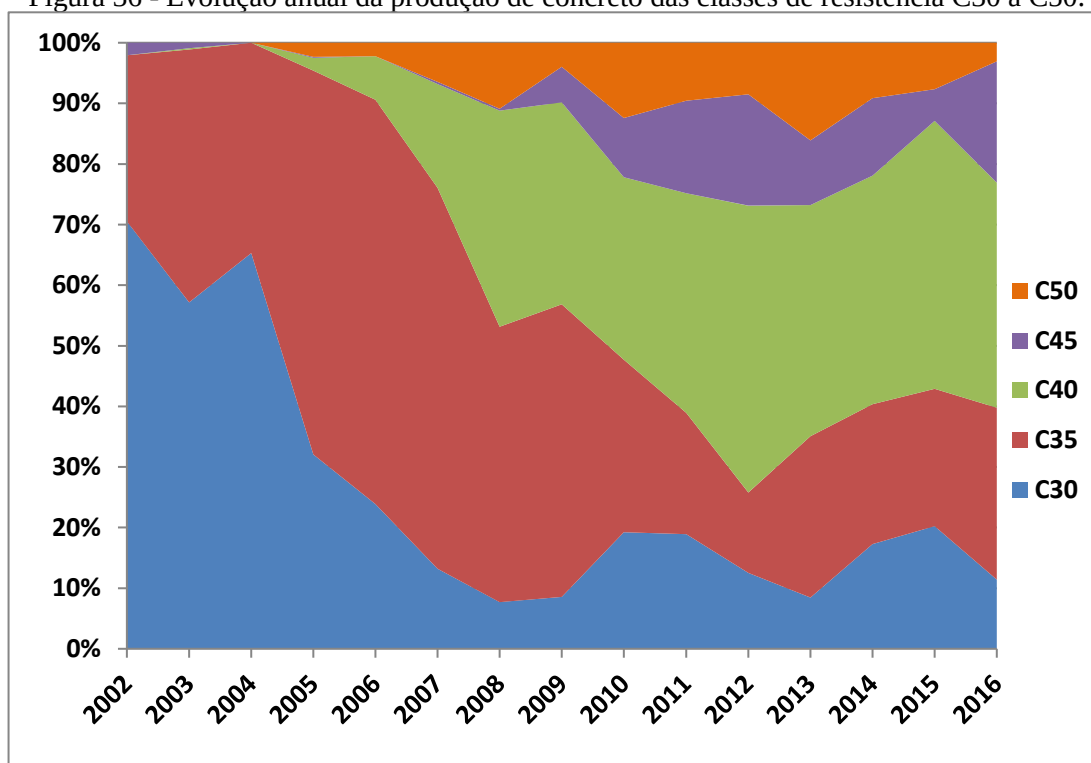
Fonte: Autor. Valores em %.

Analisando as classes de resistência de C30 a C50, de forma coletiva pela **Figura 36**, nota-se que as classes de resistência podem ser separadas em dois padrões evolutivos, um

descendente formado pelas classes C30 e C35 e outro ascendente formado pelas classes C40, C45 e C50. Nos dois primeiros triênios da pesquisa (2002 a 2004 e 2005 a 2007), os percentuais médios das classes C30 e C50 representavam respectivamente 98,9% e 87,4% de toda produção de concreto, contra 1,1% e 12,6% das classes de C40 a C50.

No terceiro triênio (2008 a 2010) os percentuais de participações de ambos os padrões praticamente se equipararam, sendo que, no último ano desse período (2010) houve o ponto de virada entre eles, onde o percentual de especificações de concretos de classes de C40 a C50 (52,3%) superou o percentual de especificações de concretos de classes C30 e C35 (47,7%). Dês de então, a produção dos concretos das classes de resistência de C40 a C50 cresceu em relação à produção de concretos de classes C30 e C35, atingindo respectivamente nos últimos três anos da pesquisa (2014 a 2016), percentuais médios de especificações de 59,0% e 41,0%.

Figura 36 - Evolução anual da produção de concreto das classes de resistência C30 a C50.



Fonte: Autor.

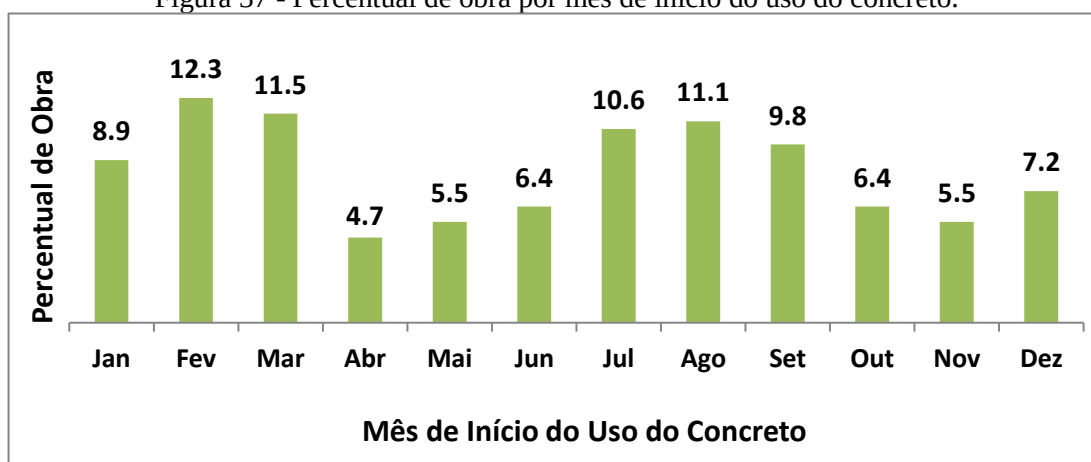
4.6.2. Início das Obras por Mês

A **Figura 37** não representa os meses em que as obras verdadeiramente iniciaram, pois uma série de serviços preliminares como projetos, aprovações legais, licenças, limpeza do terreno, instalações provisórias, *stand* de vendas, canteiro de obra etc., dificultam precisar qual a efetiva data de início das mesmas. O que a **Figura 37** realmente representa são os

meses em que as construções dos edifícios propriamente ditos iniciaram, ou seja, o mês em que o primeiro concreto foi utilizado pelas obras para executar suas fundações.

Examinando a **Figura 37**, percebe-se um padrão de dois trimestres (1º e 3º) com percentuais elevados (32,8% e 31,5%) de obras iniciadas, intercalados por dois trimestres (2º e 4º) com percentuais reduzidos (16,6% e 19,1%) de obras iniciadas. Isso é um indicativo que ao planejarem os inícios de suas construções, as construtoras tentem a se esquivarem do período mais chuvoso do ano (**Figura 29**) e a evitarem o período de final de ano.

Figura 37 - Percentual de obra por mês de início do uso do concreto.

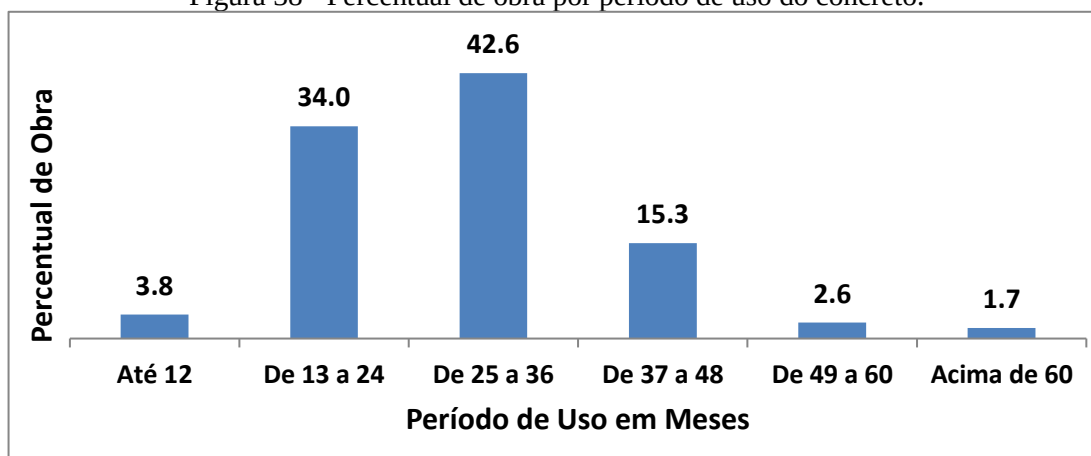


Fonte: Autor. Valores em %.

4.6.3. Período de Uso do Concreto por Obra

A **Figura 38** mostra o tempo em que o concreto passou sendo utilizado pelas obras, isto é, o intervalo em meses entre o primeiro e o último concreto aplicado na construção dos edifícios. Nota-se que 91,9% das obras se utilizam do concreto no período de 1 a 4 anos, com predomínio do intervalo de 2 a 3 anos com percentual de 42,6% do total das obras. **O período médio de utilização do concreto pelas obras da RMR é de 28,7 meses.**

Figura 38 - Percentual de obra por período de uso do concreto.



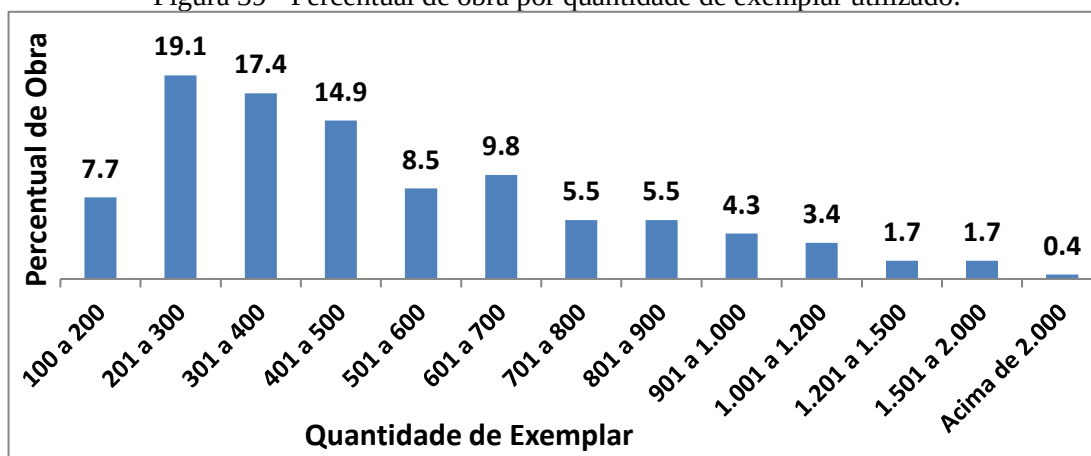
Fonte: Autor. Valores em %.

4.6.4. Percentual de Obra por Quantidade de Exemplar

A **Figura 39** representa a quantidade de exemplares ou de resultados de resistências características estimadas aos 28 dias que as obras produziram no decorrer de suas construções. A quantidade de exemplar foi escalonada de 100 em 100 até 1.000, começando da quantidade mínima de exemplares estipulada pela pesquisa, no caso 100 exemplares. A partir dos 1.000 e até os 2.000 resultados, as quantidades de cada intervalo aumentaram conforme a soma das quantidades dos seus dois intervalos anteriores.

Analisando a **Figura 39**, percebe-se que 59,2% das obras utilizaram de 100 a 500 exemplares nas suas construções, ao passo que 33,6% usaram de 500 a 1.000 e que apenas 7,2% das obras empregaram mais de 1.000 exemplares nas suas edificações. **A quantidade média de resultados de resistência característica estimada aos 28 dias das obras da RMR é de 522,6 exemplares.**

Figura 39 - Percentual de obra por quantidade de exemplar utilizado.



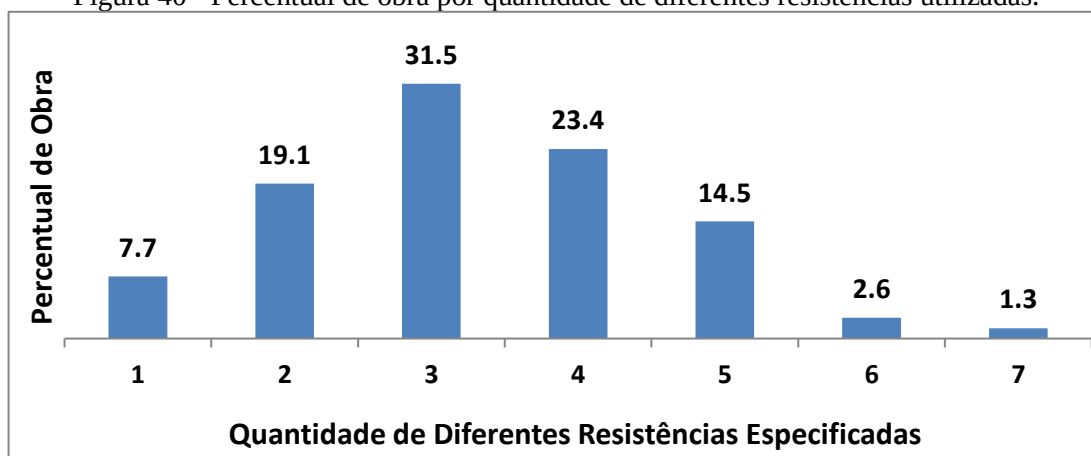
Fonte: Autor. Valores em %.

4.6.5. Percentual de Obra por Uso de Diferentes Resistências do Concreto

Baseados nas condições analíticas de segurança, os projetistas de estruturas especificam nas plantas o valor da resistência do concreto a ser utilizada em determinadas partes ou peças estruturais. Dependendo das concepções dos projetos de fundações, estrutural e até mesmo arquitetônico e de eventuais reforços estruturais, uma obra pode ser construída tanto com uma única resistência especificada do concreto, como por múltiplas resistências especificadas do concreto.

Analisando a **Figura 40**, nota-se que para apenas 7,7% das obras foram especificados um único valor de resistência do concreto, à medida que, em 92,3% das obras os projetistas especificaram a utilização de mais de um valor para a resistência do concreto. Na RMR a **quantidade média do uso de diferentes resistências de concretos é de 3,3 resistências especificadas por obra**, ou seja, entre 3 e 4 diferentes resistências por obra, justamente as duas quantidades especificadas com os maiores percentuais de obras (31,5% e 23,4%).

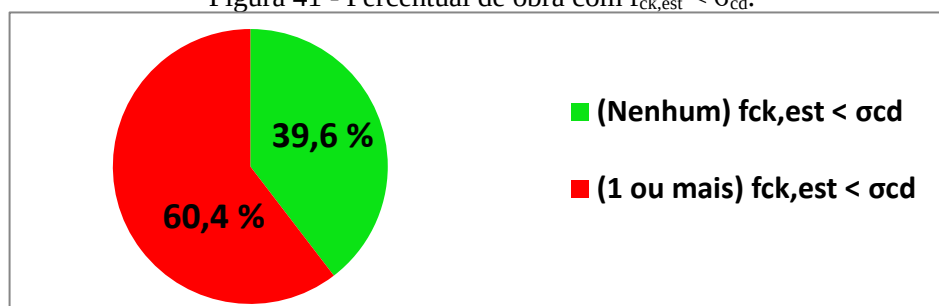
Figura 40 - Percentual de obra por quantidade de diferentes resistências utilizadas.



Fonte: Autor. Valores em %.

4.6.6. Percentual de Obra com $f_{ck,est} < \sigma_{cd}$

A **Figura 41** alerta para o percentual de obras que tiveram pelo menos um valor da resistência característica estimada menor que o valor da tensão resistente de cálculo, isto é, alerta para o percentual de obras com potencial de desrespeitar as condições analíticas de segurança determinadas pela NBR 6118/2014. Conforme item 2.3.4 ao reverificar esse tipo de anomalia uma obra, o projetista de estruturas deve solicitar a extração de testemunhos das peças afetadas e perdurando a não-conformidade, determinar o reforço estrutural. A pesquisa não chegou a identificar as obras que tiveram de proceder dessa maneira, mas o percentual de **60,4 % de obras com esse potencial de dano**, no mínimo enfatiza o nível de risco em que as obras da RMR estão se sujeitando devido as não-conformidades dos concretos.

Figura 41 - Percentual de obra com $f_{ck,est} < \sigma_{cd}$.

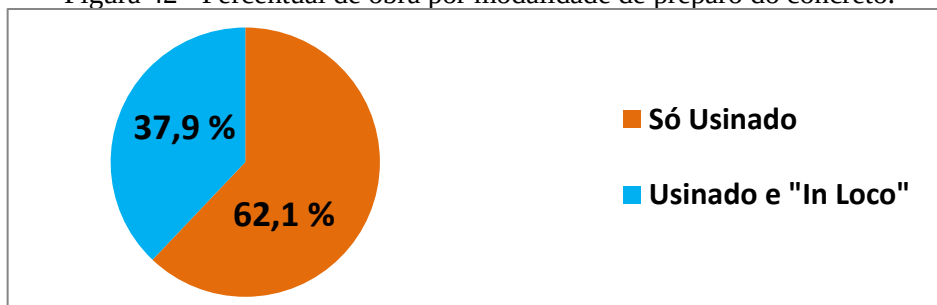
Fonte: Autor. Valores em %.

4.6.7. Modalidade de Preparo por Obra e por Construtora

A **Figura 42** mostra que 62,1% das obras só utilizaram concretos da modalidade de

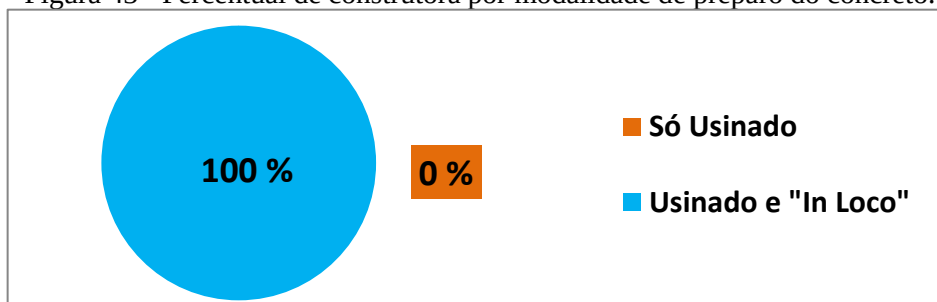
preparo usinado, ao passo, que 37,9% das obras usaram as duas modalidades, usinado e “in loco”. Apesar do percentual de concretos da modalidade “in loco” representar apenas 1,07% do total geral dos concretos produzidos na RMR, contra 98,97% dos concretos usinados (**Tabela 15**), todas as construtoras (100%) pesquisadas são adeptas das duas modalidades de preparo (**Figura 43**).

Figura 42 - Percentual de obra por modalidade de preparo do concreto.



Fonte: Autor. Valores em %.

Figura 43 - Percentual de construtora por modalidade de preparo do concreto.



Fonte: Autor. Valores em %.

4.6.8. As Dez Maiores Resistência Encontradas por Modalidade de Preparo

Dos 121.502 exemplares de concretos usinados e dos 1.308 exemplares de concretos “in loco”, verificou-se quais as 10 maiores resistências estimadas alcançadas por cada uma dessas modalidades de preparo. Na **Tabela 26** os valores são apresentados em ordem posicional crescente de importância, conjuntamente com as suas respectivas resistências especificadas. Vale salientar que esses concretos são de usos correntes, ou seja, não foram projetados especificamente para atingir altas resistências ou dosados em ambientes controlados de laboratórios, mas dosados em obras e em centrais dosadoras.

Tabela 26 - As Dez Maiores Resistência Encontradas por Modalidade de Preparo.

Ordem	“In Loco”		Usinado	
	$f_{ck,esp}$ (MPa)	$f_{ck,est}$ (MPa)	$f_{ck,esp}$ (MPa)	$f_{ck,est}$ (MPa)
10°	35,0	50,6	50,0	82,1
9°	30,0	50,9	50,0	82,3
8°	30,0	51,5	50,0	83,2
7°	35,0	51,6	50,0	83,7
6°	35,0	52,9	50,0	83,8
5°	40,0	53,0	40,0	84,0
4°	40,0	54,0	50,0	86,1
3°	35,0	54,8	50,0	86,6
2°	20,0	57,6	50,0	89,0
1°	45,0	67,4	50,0	90,8

Fonte: Autor.

Analizando as 10 maiores resistências estimadas dos concretos “in loco” e usinados, percebe-se que seus valores excederam em média 64,6% e 74,5% dos seus valores especificados, atingindo picos de 188,0% no concreto “in loco” com especificação de 20 MPa (2°) e de 110,0% no concreto usinado com especificação de 40 MPa (5°). Por melhor que aparentam ser, esses concretos com resistências estimadas muito elevadas também caracterizam um descontrole nos seus processos de produções. Em média os desvios-padrões dessas maiores resistências estimadas corresponderam a 12,1 MPa e a 22,0 MPa, respectivamente para os concretos “in loco” e usinados, com picos de 22,9 MPa e de 26,8 MPa nos dois concretos anteriormente mencionados.

Solucionando os descontroles das produções dos concretos e dos fatores próprios das logísticas dos canteiros de obras, a **Tabela 26** mostra que é perfeitamente possível obter, corriqueiramente, concretos de classes de resistências mais elevadas confeccionados pela modalidade de preparo “in loco”.

Como os dados coletados correspondem a uma amostra de uma população, não se pode afirmar com toda convicção que a **maior resistência estimada encontrada nessa pesquisa (90,8 MPa)**, seja também a maior resistência alcançada por um concreto produzido comercialmente na RMR. Porém, por falta de mais dados na literatura sobre o fato, cabe aqui, registrá-la como a sendo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Finalizada a pesquisa, tratados e analisados os dados, apresentados e discutidos os resultados, pode-se enfim, responder ao objetivo geral dessa dissertação: Qual a verdadeira qualidade dos concretos produzidos e utilizados nas obras de edifícios residenciais, comerciais e empresariais da Região Metropolitana do Recife? Além de inferir sobre as causas e aos desdobramentos da resposta a esse questionamento.

- *Qualidade do Concreto da RMR*

A qualidade do concreto da Região Metropolitana do Recife pode ser classificada em não-conformidade profunda, com percentuais médios de **20,21% dos concretos utilizados com resistência estimada abaixo da resistência especificada**. A quantidade de resultados não-conforme é 400% superior a quantidade máxima recomendada pela NBR 6118/2014, isso implica em **concretos de resistências duvidosas e pouco confiáveis**.

- *Conceitos Normativos e Estatísticos*

As normas brasileiras NBR 6118/2014 e NBR 12655/2015 são ao mesmo tempo rígidas e complacentes com os parâmetros para a obtenção da resistência estimada do concreto. Em comparação com outras normas, as normas brasileiras visam controlar e verificar a maior quantidade de concreto possível, uma condição extremamente importante do ponto de vista da segurança estrutural.

Porém, adotam níveis de significâncias maiores (5%) que de outras normas como a ACI-318 (1%), e o que é mais inquietante, descarta a utilização de um tratamento estatístico mínimo ao julgar um lote de concreto baseado unicamente no maior resultado entre dois exemplares. A falta de métodos estatísticos para avaliar a aleatoriedade de uma betonada, dá margem para associações como a ABECE, a não sentirem segurança especificamente neste item da NBR 12655/2015 e recomendarem a seus associados à adoção de outros critérios não normalizados para a obtenção das resistências estimadas.

- *Classificação das Obras pela Qualidade de seus Concretos*

O **conceito de lote global** apresentado nessa dissertação, ao passo que fornece uma classificação qualitativa para as obras, permite classificar e balizar os produtores dos

concretos por elas utilizados. Também proporciona, a qualquer pessoa, um entendimento rápido da qualidade dos concretos aplicados em determinada obra.

De todas as 235 obras da RMR pesquisadas, 229 delas foram classificadas como não-conformes (97,4%), ou seja, tiveram os percentuais totais dos seus resultados em não-conformidade acima dos 5% determinados pela norma. Sendo que do total das obras, 46,8% delas podem ser classificadas em não-conformidade profunda, com mais de 20% de seus resultados em não-conformidade. A análise individual de cada obra pelo conceito do lote global expõe nitidamente os elevados percentuais de resultados não-conformes a que essas mesmas obras estão sujeitas ao longo de suas construções e mostram para a sociedade em geral, o descaso com a qualidade de um dos mais importantes componentes da segurança estrutural e da durabilidade de um edifício.

Para se minimizar os equívocos ou os ilícitos, a classificação da obra segundo a qualidade global dos seus concretos, deveria ser realizada pelo próprio laboratório de materiais responsável pelos ensaios de resistência, preferencialmente pertencente à RBLE. Ao final da obra, essa classificação seria entregue ao construtor, acompanhada de um relatório analítico contendo todo o histórico dos ensaios de resistências para que estejam disponibilizados aos proprietários do empreendimento, juntamente com o manual de uso e ocupação do edifício, estando assim, devidamente salvaguardado e pronto para consulta.

- *Modalidade de Preparo do Concreto*

Tanto o concreto usinado, com 20,02%, quanto o concreto “in loco”, com 37,84%, encontram-se em não-conformidade profunda, porém os concretos preparados pelos construtores ainda apresentam percentuais de não-conformidade 89,01% maiores do que os concretos preparados por concreteiras. A situação dos concretos “in loco” se agrava mais, pois seus valores apresentam potencial de desrespeitar as condições analíticas de segurança 1.265% maiores do que dos concretos usinados. Essa diferença entre as modalidades de preparos pode ter como causa a menor estrutura de controle dos materiais pelas obras.

- *Classes de Resistência do Concreto*

As resistências especificadas dos concretos aumentaram com o passar dos anos, assim como a não-conformidade dos concretos. **A não-conformidade das classes de resistência tende a aumentar com o aumento das resistências,** ou seja, concretos de classes de resistências superiores tendem a apresentarem maiores percentuais de não-conformidades do que concretos de classes de resistência inferiores.

- *Desvios-Padrões*

Os desvios-padrões deveriam apresentar valores quase uniformes, independente das classes de resistência, todavia isso não se verificou, eles **tendem a aumentar com o aumento da resistência**, isto é, concretos de classes de resistências inferiores tendem a apresentar menores desvios-padrões do que concretos de classes de resistência superiores. Essa constatação, acompanhada de outros estudos, pode servir de indicativo para que a norma passe a determinar diferentes desvios-padrões iniciais para diferentes classes de resistência.

Pelos valores encontrados nas resistências médias (f_{cm}) das classes de resistência, pôde-se calcular pela equação **18** que seus concretos foram dosados com desvios-padrões variando de 2,1 MPa a 2,9 MPa, valores bem próximos ao mínimo desvio-padrão (2,0 MPa) recomendado pela NBR 12655/2015 quando se afere o processo de produção do concreto. Porém, esse cálculo está totalmente incondizente com os verdadeiros valores dos desvios-padrões encontrados pela pesquisa. Os desvios-padrões dos concretos estruturais do grupo I (C20 a C50) **variaram de 5,6 MPa a 7,6 MPa, valores mais pertinentes com as condições de preparados B e C**, e não esperados para concretos estruturais de condição de preparo A.

- *Coefficiente de Variação*

O coeficiente de variação numa produção bem controlada de concreto **tende a diminuir com o aumento das classes de resistência**. A utilização do coeficiente de variação para o entendimento e a comparação com outras produções de concreto, **só é eficaz quando analisados entre as mesmas classes de resistência**, quando se analisam diferentes classes de resistência, o coeficiente de variação torna-se ineficaz e induz a falsas interpretações.

- *Simulação via Método Monte Carlo*

O intento da simulação realizada é de questionar e propor alternativas fundamentadas em processos matemáticos à falta de um critério minimamente estatístico pela NBR 12655/2015, quando a mesma determina que a resistência à compressão de uma betonada deva ser igual à maior resistência entre dois corpos-de-prova. O aqui denominado critério de estimativa S, o mais próximo ao adotado pela ACI-318, ao utilizar a média entre os dois valores dos exemplares de uma amostra, reduz a estimativa inicial do concreto em média em **7,01%**. Apesar do critério da média dos valores produzirem **34,4%** na não-conformidade total dos concretos, ele se presta adequadamente de opção para uma mudança ao atual critério adotado pela NBR 12655/2015, principalmente por ser obtido via processo estatístico.

- *Fatores que Interferem na Resistência*

No caso dessa pesquisa, o laboratório de ensaios que é credenciado à RBLE o que transmite segurança e credibilidade. As construtoras são certificadas, investem em qualidade e na melhoria continua dos seus processos e produtos. As concreteiras são grandes empresas nacionais e multinacionais que atendem em todo Brasil e até em outros países, possuindo o *know-how* necessário para a sua atividade. Então, quais seriam as causas pela absurda quantidade de concretos não-conformes aplicados nas obras pesquisadas?

Ao analisar as resistências médias das diversas classes de resistências, percebe-se que seus valores são incondizentes com seus respectivos desvios-padrões. Os produtores de concreto ao utilizarem nas dosagens de seus concretos **valores de desvios-padrões inferiores aos verdadeiramente apurados** assumem para si a responsabilidade pelo aumento no percentual de não-conformidade dos concretos, ou seja, **a principal causa que essa pesquisa identifica é o erro primário no valor da resistência de dosagem.**

Outro aspecto que não é uma causa em si, mas que contribui para a perpetuação dos altos percentuais de não-conformidades dos concretos, é que o mercado da construção civil como um todo já aceitou como normal a transformação da exceção (não-conformidade) em regra. O tema da não-conformidade do concreto apesar de notório no meio técnico e inúmeras vezes abordado por revistas, artigos, fóruns e palestras, ainda é tratado como um enorme tabu.

Essa problemática só terá uma solução quando os diversos segmentos envolvidos, pararem de adotar medidas individuais para se protegerem dos riscos provocados por concretos não-conformes, e adotarem medidas coletivas mais contundentes de enfrentamento desse transtorno. Nesse sentido, o Código de Defesa do Consumir é o instrumento basilar com a força necessária para coibir esse rotineiro desrespeito as recomendações normativas. De acordo com o parágrafo VIII, do artigo 39, da seção IV, do capítulo V, do Código de Defesa do Consumidor (2018) que trata das práticas comerciais abusivas:

“É vedado ao fornecedor de produtos ou serviços, dentre outras práticas abusivas: colocar, no mercado de consumo, qualquer produto ou serviço em desacordo com as normas expedidas pelos órgãos oficiais competentes ou, se normas específicas não existirem, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ou outra entidade credenciada pelo Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.”

Na sua essência, a Engenharia trata de solucionar problemas em prol da coletividade, e

fingir que o problema dos elevados percentuais de não-conformidade do concreto não existe ou tratá-lo como algo menor ou até mesmo natural, pode ser qualquer outra coisa, mas com certeza não é Engenharia.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

O tema da não-conformidade dos concretos é bastante extenso e controverso, permitindo ser abordado por diferentes aspectos, cada um apresentando diversas variáveis a serem analisadas. Dentre tantas possibilidades, sugeri-se:

- A simples continuação desse trabalho, complementando os indicadores da RMR a partir do último ano pesquisado;
- A verificação dos percentuais de não-conformidade dos concretos de outras cidades, estados, regiões e até mesmo em âmbito nacional;
- A classificação das obras de outras cidades, estados e regiões, através do conceito do Lote Global;
- A classificação das concreteiras de outras cidades, estados e regiões, através do conceito do Lote Global;
- O aprofundamento das causas das não-conformidades dos concretos, no intuito não de apresentar culpados, mas de focar na correção do problema;
- A confrontação entre os percentuais de não-conformidade dos concretos cujos procedimentos de moldagem e de transporte foram realizados por funcionários das construtoras, com os realizados por laboratoristas especializados dos próprios laboratórios de ensaios pertencentes à RBLE;
- Verificar se a precipitação pluviométrica interfere no percentual de não-conformidade do concreto;
- Verificar se tanto o desvio-padrão quanto o percentual de não-conformidade crescem com o aumento das classes de resistência.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA ESTADUAL DE PLANEJAMENTO E PESQUISAS DE PERNAMBUCO. Disponível em: <<http://www.anuario.pe.gov.br/atividades-economicas/industria>>. Acesso em: 14/09/2017.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>>. Acesso em: 01/01/2018.

ALVES, J. D. **Manual de Tecnologia do Concreto**. 1. ed. Goiânia: Associação Brasileira de Editoras Universitárias, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL. **Estruturas de Concreto: Conformidade da Resistência do Concreto**. 2009. Concrete Show South America 2009. São Paulo, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projetos de estruturas de concreto - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7212**. Execução de concreto dosado em central - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-1**. Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**. Concreto para fins estruturais - Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**. Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11562**. Fabricação e transporte de concreto para estruturas de centrais nucleoeletricas. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**. Concreto de cimento Portland - Preparo, Controle, recebimento e aceitação - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17025**. Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33**. Concreto - Amostragem de Concreto Fresco. Norma MERCORSUR. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**. Concreto - Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone. Método de Ensaio. Norma MERCORSUR. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO DAS EMPRESAS DO MERCADO IMOBILIÁRIO DE PERNAMBUCO. Disponível em: < <https://www.ademi-pe.com.br/associados-2/>>. Acesso em: 14/09/2017.

BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. S. **O Cimento Portland no Brasil**. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 24, 2010.

BATTAGIN, I. L. S. **Normas Técnicas de Concreto e Estruturas**. In: Concreto: Ciência e Tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 5, 2011.

BATLOUNI NETO, J. **Diretrizes do Projeto de Estrutura para Garantia do Desempenho e Custo**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa, e Realizações. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 7, 2005.

BAUER, L. A. F. et al. **Propriedades do Concreto**. In: Materiais de Construção. 1. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Capítulo 10, 1979.

BAUER, E.; KRAUSS, E.; SILVA, R. S. Y. C.; NABUT NETO, A. C. **Análise da Variabilidade na Produção do Concreto: Estudo de Caso**. In: ANAIS DO 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Fortaleza, 2010.

BORGES, M. L.; GEYER, A. B. **Avaliação da Qualidade de Concretos Produzidos em Centrais Dosadoras, Misturados em Caminhão-Betoneira e de Concretos Produzidos em Centrais Misturadoras**. In: ANAIS DO 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Fortaleza, 2010.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 9. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2017.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas de Concreto Armado**. 4. Ed. São Carlos: Edufscar, 2015.

CASCUDO, O. **Estrutura Atômica e Molecular dos Materiais**. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 6, 2010.

CASELLA, G.; BERGER, R. L. **Inferência Estatística**. 2. ed. Boston: Cengage Learning, 2010.

CHIARA, M. **Votorantim importa 10 navios de cimento**. O Estado de São Paulo. São Paulo, jul. 2010. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,votorantim-importa-10-navios-de-cimento-imp-,581335>>. Acesso em: 19.01.2018.

CÓDIGO DE DEFESA DO CONSUMIDOR. Disponível em:

< http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8078.htm>. Acesso em: 19.01.2018.

COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO DO RECIFE. Disponível em:

<<http://www.comunidadeconstrucao.com.br/comunidade-construcao/parceiros/12/recife/>>.

Acesso em: 14/09/2017.

DIA DO ENGENHEIRO 2011, 2011, Recife. **Estruturas de Concreto: Melhorias de Projeto e Produção.**

FARIA, R. **Resistência à prova.** Revista Técnica. São Paulo, v. 152, p. 42-54, nov. 2009.

FERRAZ, T. G. A. **Ações para a melhoria do serviço de concretagem da comunidade da construção em Salvador-BA.** 2011. Palestra do Dia do Engenheiro 2011. Ademi-PE, Recife, 2011. (Informação Verbal).

FONTES, F. F.; PINHEIRO, L. M.; BITTENCOURT, T. **Conceitos de Análise Estrutural.** In: Concreto: Ensino, Pesquisa, e Realizações. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 4, 2005.

FUSCO, P. B. **Estruturas de Concreto: Fundamentos do Projeto Estrutural. V1.** 1. ed. São Paulo, Ed. McGraw-Hill do Brasil, 1976a.

FUSCO, P. B. **Estruturas de Concreto: Fundamentos Estatísticos da Segurança das Estruturas. V2.** 1. ed. São Paulo, Ed. McGraw-Hill do Brasil, 1976.

FUSCO, P. B. **Princípios Básicos para Projeto de Estruturas de Concreto.** In: Concreto: Ciência e Tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 3, 2011.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural: Tópicos Aplicados.** 2. ed. São Paulo, Ed. Pini, 2012.

GIAMMUSSO, S. E. **Manual do Concreto.** 1. ed. São Paulo: Pini, 1992.

GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. Disponível em:
<<http://www.pe.gov.br/conheca/geografia/>>. Acesso em: 15/09/2017.

GUIMARÃES, A. T. C. **Propriedades do Concreto Fresco**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa, e Realizações. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 16, 2005.

HELENE, P. R. L. **Controle de Qualidade do Concreto**. 1980. 129 f. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

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

HELENE, P. R. L. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa, e Realizações. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 15, 2005.

HELENE, P. R. L.; ANDRADE, T. W. C. O. **Concreto de Cimento Portland**. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V2, Capítulo 29, 2010.

HELENE, P. R. L. **Contribuição à Análise da Resistência do Concreto em Estruturas Existentes para Fins de Avaliação da Segurança**. São Paulo, texto provisório datado de 18.05.2011. 44p. Disponível em: <www.concretophd.com.br>. Acesso em: 03/08/2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em:
<<https://cidades.ibge.gov.br/v4>>. Acesso em: 15/09/2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA.
Disponível em:
<http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rble/lista_laboratorios.asp?sigLab=&ordem=&tituloLab=&uf=&pais=&descr_escopo=&classe_ensaio=&area_atividade=19&ind_tipo_busca=&pagina=2>. Acesso em: 24/09/2017.

ISAIA, G. S. **O Concreto: da Era Clássica à Contemporânea**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa, e Realizações. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 1, 2005.

ISAIA, G. S. **A Ciência e a Engenharia de Materiais na Construção Civil**. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 1, 2010.

JACINTHO, A. E. P. G. A.; GIONGO, J. S. **Resistência Mecânica do Concreto**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa, e Realizações. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 20, 2005.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa, e Realizações. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 10, 2005.

MAGALHÃES, F. C.; REAL, M. V. **Análise Estatística do Concreto Empregado na Construção da Laje de Fundo do Dique Seco do Estaleiro Rio Grande**. In: ANAIS DO 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Fortaleza, 2010.

MARTIN, J. F. M. **Aditivos para Concreto**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa, e Realizações. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 13, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades, e Materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MELO, A. **A História do Recife sobre duas Rodas – Arquitetura, Urbanismos e Paisagismo**. Disponível em:

<<http://estudentarquiteturarecifehistoria.blogspot.com.br/2014/11/em-que-bairro-comecar.html>>. Acesso em: 03/03/2018.

MITIDIERI FILHO, C. V. **Qualidade e Desempenho na Construção Civil**. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 2, 2010.

MOLIN, D. C. C. D. **Adições Minerais para Concreto Estrutural**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa, e Realizações. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 12, 2005.

MORAES, E. F. Disponível em: < <http://evelinmoraes.blogspot.com.br/2013/12/>>. Acesso em: 07/02/2018.

MUNHOZ, F. A. C.; CURTI, R. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Curso Intensivo de Tecnologia Básica do Concreto: Notas de Aula**. ABCP. São Paulo, 2015.

NAKAMURA, J. **NBR 6118: A Busca da Durabilidade**. Revista Técnica. São Paulo, v. 86, mai. 2004.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. São Paulo: Pini, 2015.

OLIVEIRA, R. A. **Estatística Aplicada à Engenharia Civil: Notas de Aula**. UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO. Recife, 2016.

OLIVEIRA, R. A. **Simulações Computacionais dos Parâmetros Estatísticos do Concreto de Classe C30 via Método Monte Carlo**. Recife, 2018.

PACHECO, J.; HELENE, P. R. L. **Controle da Resistência do Concreto**. Alconpat Internacional: Boletim Técnico 09. Mérida - México, 2013.

PENEDO, E. **ABNT NBR 8953:2015 Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Vitória, apresentação ao Sinduscon/ES datada de 19.03.2015. Disponível em: <http://www.sinduscon-es.com.br/v2/upload/2032015112422_NBR%208953%20%20Eng%20Eric%20Penedo,%20M.Sc.pdf>. Acesso em: 24/11/2017.

PAULON, V. A. **Microestrutura do Concreto Convencional**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa, e Realizações. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 19, 2005.

PEREIRA, M. S. **Controle da Resistência do Concreto: Paradigmas e Variabilidades – Estudo de Caso**. 2008. 229 f. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Distrito Federal, 2008.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. 4. ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1979.

PREFEITURA DA CIDADE DO RECIFE. Disponível em:

<<http://www2.recife.pe.gov.br/servico/planejamento-urbano>>. Acesso em: 15/09/2017.

RECENA, F. A. P.; PEREIRA, F. M. **Produção e Controle de Concreto em Obra**. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 15, 2011.

ROCHA, S. **Estatística Geral e Aplicada para Cursos de Engenharia**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2015.

ROMAN, L. M. F., JOBIM, M. S. S., ROMAN, H. R., BATTAGIN, I. L. S. **Normalização na Construção Civil**. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 3, 2010.

SANTIAGO, W. C. **Estudo da (Não-) Conformidade de Concretos Produzidos no Brasil e sua Influência na Confiabilidade Estrutural**. 2011. 107 f. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2011.

SILVA, D. F.; COSER, J. B.; BAUER, R. J. F. **Recebimento do Concreto e Coleta de Amostras no Canteiro**. Revista Técnica. São Paulo, v. 152, p. 86-88, nov. 2009.

SILVA, A. J. C.; SANTOS, C. F.; CRUZ NETO, J. M.; MONTEIRO, E. C. B. **Discussão dos Fatores de Influência nas Operações de Ensaio em Corpos-de-Prova de Concreto**. In: **ANAIS DO 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, Fortaleza, 2010.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DE PERNAMBUCO. Disponível em: <<http://www.sindusconpe.com.br/associados>>. Acesso em: 14/09/2017.

SOUZA, R. A.; BITTENCOURT, T. N. **Definição de Expressões Visando Relacionar f'_c e f_{ck}** . ENTECA 2003: IV Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura. Maringá, 2003.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. 1. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S. A., 1968.

TANGO, C. E. S. **Produção, Transporte e Controle do Concreto**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa, e Realizações. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 17, 2005.

TECOMAT ENGENHARIA. Disponível em: <<http://www.tecomat.com.br/empresa/sobre>>. Acesso em: 14 Abril de 2017.

THOMAZ, E. C. S. **Execução, Controle e Desempenho das Estruturas de Concreto**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa, e Realizações. 2. ed. São Paulo: IBRACON, V1, Capítulo 18, 2005.

THOMAZ, E. C. S. **Hidratação do Cimento: Notas de Aulas**. INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA. Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/Hidratacao_do_cimento.pdf>. Acesso em: 19/10/2017.

VIEIRA FILHO, J. O. **Avaliação da Resistência à Compressão do Concreto através de Testemunhos Extraídos: Contribuição à Estimativa do Coeficiente de Correção devido aos Efeitos do Broqueamento**. 2007. 216 f. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2007.

ZANETTI, J. J. **Falhas dos Processos de Laboratório que Comprometem a Avaliação dos Resultados de Resistência dos Concretos**. In: ANAIS DO 51º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Curitiba, 2009.