

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Lucas Lopes Vitali

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE CIMENTOS PORTLAND
NAS CURVAS DE DOSAGEM DE CONCRETOS CONVENCIONAIS
OBTIDAS PELO MÉTODO DO IBRACON**

Florianópolis
2023

Lucas Lopes Vitali

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE CIMENTOS PORTLAND
NAS CURVAS DE DOSAGEM DE CONCRETOS CONVENCIONAIS
OBTIDAS PELO MÉTODO DO IBRACON**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof.^a Janaíde Cavalcante Rocha, Dr.^a

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Vitali, Lucas Lopes

Influência de diferentes tipos de cimentos Portland nas curvas de dosagem de concretos convencionais obtidas pelo método IBRACON / Lucas Lopes Vitali ; orientadora, Janaíde Cavalcante Rocha, 2023.

99 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Cimento Portland. 3. Dosagem.
4. Concreto. I. Rocha, Janaíde Cavalcante. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil.
III. Título.

Lucas Lopes Vitali

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE CIMENTOS PORTLAND
NAS CURVAS DE DOSAGEM DE CONCRETOS CONVENCIONAIS
OBTIDAS PELO MÉTODO DO IBRACON**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Civil” e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 15 de dezembro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof.^a Janaíde Cavalcante Rocha, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador(a)

Prof. Lourenço Panosso Perlin, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Caroline Venâncio Moresco, Dr.^a
Universidade do Vale do Itajaí

*Aos melhores pais do mundo:
Rita e Jorge.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelas incríveis oportunidades surgidas na minha vida até aqui, e por me dar força e perseverança nos momentos difíceis para levantar, continuar em frente e jamais desistir.

À professora e orientadora Janaíde Cavalcante Rocha, pela ajuda e confiança creditada a mim para condução e elaboração deste trabalho.

Aos professores da banca examinadora: Carolina Venâncio Moresco e Lourenço Panosso Perlin, que se dispuseram a avaliar este trabalho. Deixo um agradecimento especial a este último, por sempre se mostrar motivado e disposto a contribuir com as pesquisas de seus alunos. Agradeço-o também pela concessão do espaço e dos equipamentos do Laboratório de Experimentação em Estruturas (LEE) para a realização da parte prática da pesquisa.

Ao Renato Lapa, técnico do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), pela ajuda nos rompimentos dos corpos de prova.

Ao Fernando Brandes, consultor comercial da Itambé Cimentos, pela doação das amostras de cimentos; ao Jair Esteves, gerente técnico da Concrebrás, pela disponibilização dos agregados; ao Flaviano Furtado, representante comercial da Sika, pela doação da amostra de aditivo superplastificante.

Ao grande amigo Paulo Augusto, colega da graduação, parceiro de pesquisas, concretagens, leituras de ultrassom e quem se tornou um irmão da vida.

À minha namorada Évelyn, pelo carinho e apoio dedicados e pela compreensão nos momentos em que estive ausente devido aos estudos.

Por fim, um agradecimento especial aos meus pais, Rita de Cássia e Jorge, meus verdadeiros heróis. Amo vocês!

RESUMO

A produção mundial do cimento alcançou a marca de 4,4 bilhões de toneladas em 2021 e tem projeção de atingir 4,8 bilhões em 2030. Contudo, para cada tonelada de clínquer, principal composto do cimento, são emitidos, em média, 842 kg de gás carbônico na atmosfera. Assim, a estratégia mais adotada pela indústria cimenteira para mitigar tal efeito é utilizar adições minerais na composição do cimento em substituição parcial do clínquer, dando origem a diferentes tipos de cimentos Portland compostos com característica distintas. Conseqüentemente, os concretos produzidos por estes cimentos também terão suas propriedades modificadas e uma excelente forma de avaliar essa interferência é através do estudo de dosagem. Diante do exposto, esta pesquisa propôs a análise da influência dos cimentos CP II-F-40, CP II-F-32, CP IV-32-RS e CP V-ARI no processo e nas curvas de dosagem obtidas pelo método do IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto). Foram construídos os diagramas típicos de uma família de concreto de mesma trabalhabilidade ($slump = 140 \pm 20$ mm) referentes aos quatro cimentos. Desta forma, foi possível apresentar uma ferramenta de auxílio aos engenheiros para desenvolver traços de concreto de maneira mais produtiva e assertiva quando houver a necessidade de mudança no tipo de cimento do concreto a ser produzido. O CPV-ARI foi o cimento que demonstrou melhor desempenho, com rendimento (MPa/kg) superior aos demais, principalmente em traços de resistências elevadas.

Palavras-chave: cimento Portland; concreto; dosagem.

ABSTRACT

World cement production reached the mark of 4.4 billion tons in 2021, with a projection to reach 4.8 billion by 2030. However, for every ton of clinker, the main compound in cement, an average of 842 kg of carbon dioxide is emitted into the atmosphere. Therefore, the most widely adopted strategy by the cement industry to mitigate this effect is to use mineral additions in the cement composition as a partial replacement for clinker, giving rise to different types of Portland composite cements with distinct characteristics. Consequently, the concretes produced by these cements will also have their properties modified and an excellent way to evaluate this interference is through dosage studies. In this context, this research proposed the analysis of the influence of CP II-F-40, CP II-F-32, CP IV-32-RS, and CP V-ARI cements on the process and dosage curves obtained by the IBRACON method (Brazilian Concrete Institute). Typical diagrams were constructed for a family of concrete with the same workability (slump = 140 ± 20 mm) for the four cements. In this way, it was possible to present a tool to assist engineers in developing concrete mixes more productively and accurately when there is a need to change the type of cement to be used in production. CPV-ARI was the cement that demonstrated the best performance, with a yield (MPa/kg) higher than the others, especially in high-resistance concretes.

Keywords: Portland cement; concrete; dosage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da Lei de Lyse para concretos com mesma consistência.	34
Figura 2 – Diagrama de dosagem dos concretos de cimento Portland.	35
Figura 3 – Curva de correlação do traço com o módulo de finura do agregado total e a relação água/cimento.	45
Figura 4 – Curvas de trabalhabilidade obtidas a partir dos índices de remoldagem de Powers para concretos com igual m e diferentes relações a/m	48
Figura 5 – Curvas de Walz para determinação da relação água/cimento (x) em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias.	52
Figura 6 – Determinação da massa específica dos agregados miúdos pelo método do picnômetro.	59
Figura 7 – Curvas e limites granulométricos dos agregados miúdos	61
Figura 8 – Curvas e limites granulométricos dos agregados graúdos	62
Figura 9 – Curvas granulométricas da composição dos agregados miúdos	66
Figura 10 – Determinação da umidade da areia natural (a) e da areia artificial (b) pelo ensaio do frasco de Chapman.	67
Figura 11 – Determinação da massa específica e do teor de ar do concreto fresco.	68
Figura 12 – Moldagem (a) e cura (b) dos corpos de prova.	69
Figura 13 – Relação entre o D_{max} do agregado, o consumo de cimento e o teor de ar aprisionado no concreto.	71
Figura 14 – Fluxograma das etapas do programa experimental.	72
Figura 15 – Pesagem e separação prévia dos materiais da primeira iteração (a) e das adições subsequentes (b).	74
Figura 16 – Aspecto superficial (a) e consistência ($slump = 25$ mm) (b) do concreto com $\alpha = 50\%$	75
Figura 17 – Aspecto superficial (a) e consistência do concreto de traço $m = 6$ ($slump = 35$ mm) (b) do concreto com $\alpha = 54\%$	76
Figura 18 – Aspecto superficial (a) e consistência do concreto de traço $m = 6$ ($slump = 145$ mm) (b) do concreto com $\alpha = 56\%$	77
Figura 19 – Aspecto superficial (a) e consistência do concreto de traço $m = 6$ ($slump = 140$ mm) (b) com $\alpha = 58\%$	78
Figura 20 – Consistências do concreto de traço $m = 5$ ($slump = 140$ mm) (a) e de traço $m = 7$ ($slump = 135$ mm) (b) com $\alpha = 58\%$	80
Figura 21 – Influência do teor de aditivo superplastificante no teor de ar aprisionado.	84
Figura 22 – Variação do consumo de cimento em função do tipo de cimento e do traço m	85

Figura 23 – Diagramas de dosagem dos concretos relativos aos cimentos CP II-F40, CP II-F32, CP IV-32-RS e CP V-ARI.	87
Figura 24 – Curvas de Abrams.	88
Figura 25 – Curva de Lyse.	89
Figura 26 – Curvas de Preszkulnik & Kirilos.	90
Figura 27 – Curvas de rendimento.	91
Figura 28 – Aspecto superficial dos concretos de traço $m = 6$	99
Figura 29 – Exemplo de carta traço usual emitida por central dosadora de concreto.	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.	25
Quadro 2 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa).	26
Quadro 3 – Requisitos físicos e mecânicos dos cimentos Portland.	27
Quadro 4 – Valores de s_d em função do rigor da produção do concreto.	40
Quadro 5 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.	41
Quadro 6 – Classes de agressividade ambiental.	41
Quadro 7 – Composição granulométrica dos agregados miúdos.	60
Quadro 8 – Granulometria dos agregados graúdos.	62
Quadro 9 – Determinação da composição granulométrica do agregado graúdo.	65
Quadro 10 – Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo.	66
Quadro 11 – Cálculo dos acréscimos de materiais na determinação do teor de argamassa ideal.	73
Quadro 12 – Quantidades de materiais adicionadas na betoneira referentes à replicação do traço $m = 6$	78
Quadro 13 – Quantidades de materiais adicionadas na betoneira referentes à todos os traços.	81
Quadro 14 – Traços finais e parâmetros dos concretos no estado fresco.	83
Quadro 15 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão axial.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Síntese cronológica das principais contribuições à dosagem de concretos.	36
Tabela 2 – Valores indicativos da relação água/materiais secos H inicial.	46
Tabela 3 – Valores indicativos das relações areia/agregado total (a/m) a serem estudadas.	47
Tabela 4 – Estimativa inicial de m em função de D_{max} e de x	53
Tabela 5 – Regressão linear das Leis clássicas da tecnologia do concreto.	58
Tabela 6 – Composições químicas dos cimentos Portland.	63
Tabela 7 – Propriedades físicas e mecânicas dos cimentos Portland.	63
Tabela 8 – Características do aditivo químico.	64
Tabela 9 – Definição dos traços rico, intermediário e pobre.	79
Tabela 10 – Relação entre resistência à compressão e o consumo de cimento.	86
Tabela 11 – Dados utilizados na plotagem das curvas de dosagem.	86
Tabela 12 – Coeficientes da Lei de Abrams.	88
Tabela 13 – Coeficientes da Lei Lyse.	89
Tabela 14 – Coeficientes da Lei de Preszkulnik & Kirilos.	90
Tabela 15 – Coeficientes da equação do 4° Quadrante.	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ITERS	Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MMUC	Máxima Massa Unitária Compactada

LISTA DE SÍMBOLOS

D_{max}	Dimensão máxima característica do agregado graúdo
H	Teor de água/materiais secos
f_{mj}	Resistência a compressão da argamassa na idade de j dias
j	Idade do concreto em dias
V	Volume
a/c	Relação em massa de água/cimento
f_{cj}	Resistência a compressão do concreto na idade de j dias
m	Relação em massa de agregados/cimento
x	Massa de água em relação à massa de cimento
C	Consumo de cimento por m^3 de concreto
a	Massa de agregado miúdo em relação à massa de cimento
p	Massa de agregado graúdo em relação à massa de cimento
M	Massa
ρ	Massa específica
f_{ck}	Resistência a compressão característica do concreto
s_d	Desvio padrão de dosagem
MF	Módulo de finura
a/m	Relação em massa: agregado miúdo/agregado total
α	Teor de argamassa
Q	Quantidade de material adicionada na betoneira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	20
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	CIMENTO PORTLAND	21
2.1	FABRICAÇÃO	21
2.1.1	Matérias-primas	21
2.1.2	Obtenção do clínquer	22
2.1.3	Composição química	23
2.2	ADIÇÕES MINERAIS	23
2.2.1	Pozolanas	24
2.2.2	Escórias de alto forno	24
2.2.3	Filers	25
2.3	CLASSIFICAÇÃO DOS CIMENTOS NACIONAIS	25
2.3.1	CP I e CP I-S	27
2.3.2	CP II (E, Z ou F)	27
2.3.3	CP III	28
2.3.4	CP IV	28
2.3.5	CP V	28
2.3.6	CP Branco	29
3	DOSAGEM DO CONCRETO	30
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	30
3.2	PRINCÍPIOS BÁSICOS	31
3.2.1	Dosagem racional e experimental	31
3.2.2	Relação compacidade vs. resistência	32
3.2.3	Relação água/cimento vs. resistência	32
3.2.4	Água total vs. trabalhabilidade	33
3.2.5	Consumo de cimento vs. quantidade de agregados	34
3.2.6	Traço	36
3.2.7	Consumo de cimento	37
3.3	RESISTÊNCIA DE DOSAGEM	39
3.4	MÉTODOS DE DOSAGEM NACIONAIS	42
3.4.1	Método do IPT	42
3.4.1.1	Introdução	42

3.4.1.2	<i>Etapas do método</i>	43
3.4.2	Método do ITERS	45
3.4.2.1	<i>Introdução</i>	45
3.4.2.2	<i>Etapas do método</i>	46
3.4.3	Método do IBRACON (IPT/EPUSP)	50
3.4.3.1	<i>Introdução</i>	50
3.4.3.2	<i>Limites de aplicação</i>	50
3.4.3.3	<i>Etapas do método</i>	51
4	MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL	59
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS	59
4.1.1	Agregados miúdos	59
4.1.2	Agregados graúdos	61
4.1.3	Cimentos	63
4.1.4	Aditivo	63
4.2	PROCEDIMENTOS GERAIS E EQUIPAMENTOS	64
4.2.1	Composição granulométrica dos agregados	64
4.2.2	Umidade das areias	67
4.2.3	Misturas	67
4.2.4	Consistência da mistura	68
4.2.5	Massa específica, ar aprisionado e consumo de cimento	68
4.2.6	Corpos de prova	69
4.3	DESENVOLVIMENTO DAS DOSAGENS	69
4.3.1	Considerações e parâmetros iniciais	70
4.3.2	Determinação do teor de argamassa ideal (α^*)	72
4.3.2.1	<i>Primeira iteração</i>	73
4.3.2.2	<i>Terceira iteração</i>	74
4.3.2.3	<i>Quinta iteração</i>	75
4.3.2.4	<i>Sexta iteração</i>	76
4.3.2.5	<i>Replicação do traço $m = 6$</i>	77
4.3.3	Desenvolvimento dos traços auxiliares	78
4.3.4	Dosagens com os outros tipos de cimento	80
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	82
5.1	CONCRETO FRESCO	82
5.1.1	Teor de argamassa ideal	82
5.1.2	Relações a/c e H	82
5.1.3	Teor de aditivo e teor de ar aprisionado	83
5.1.4	Consumo de cimento	84
5.2	CONCRETO ENDURECIDO	85
5.2.1	Resistência mecânica	85

5.3	CURVAS DE DOSAGEM	86
5.3.1	Lei de Abrams	87
5.3.2	Lei de Lyse	88
5.3.3	Lei de Preszkulnik & Kirilos	89
5.3.4	4º Quadrante	91
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
6.1	LIMITAÇÕES DAS CONCLUSÕES	94
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
	REFERÊNCIAS	96
	APÊNDICE A Teor de argamassa	99
	ANEXO A Exemplo de carta traço	100

1 INTRODUÇÃO

Em 2021, o volume total de cimento produzido no mundo foi de 4,4 bilhões de toneladas, com perspectiva de atingir, em 2030, 4,8 bilhões. Na metade da década de 90, esse número não chegara a 1,4 bilhões, Garside (2022), indicando o forte crescimento do setor desde então. A maior produção do insumo está concentrada no continente asiático, sendo a China e a Índia os responsáveis por 57,2% e 7,0%, respectivamente, da produção mundial em 2020. O Brasil ocupou a sexta posição no ranking com 1,4% da produção mundial no mesmo ano (CEMBUREAU, 2020).

A indústria nacional brasileira do cimento terminou o ano de 2020, em meio à pandemia de COVID-19, com um total de 61 milhões de toneladas de cimento produzidas, um aumento de 7,8% sobre o ano anterior. Isso só foi possível devido às rápidas ações tomadas pela indústria do cimento, que viabilizaram em meio a uma surpreendente pressão de demanda, a continuidade do fornecimento regular e de qualidade do insumo, mesmo num cenário de forte aumento de custos de produção. Os principais indutores do crescimento da atividade foram o auxílio emergencial concedido pelo governo federal, a autoconstrução e as obras imobiliárias — que garantiram 80% das vendas de cimento, assegurando o bom desempenho do setor no período (ABCP, 2021; SNIC, 2020).

Apesar desses grandes números de produção refletirem positivamente o desenvolvimento econômico de um país, é necessário destacar o seu impacto ambiental negativo, uma vez que a cada tonelada de clínquer produzida, é emitido, em média, 842 kg de gás carbônico, CSI (2016), na atmosfera. Assim, a estratégia mais adotada pela indústria cimenteira para mitigar tal efeito é utilizar adições minerais¹ na composição do cimento em substituição parcial do clínquer. No Brasil, a proporção e o tipo de material substituinte são normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), dando origem aos diferentes tipos de cimentos Portland compostos disponíveis no mercado nacional.

Consequentemente, os materiais de matriz cimentícia terão as propriedades alteradas a depender do tipo de cimento utilizado em suas composições. No caso do concreto, por exemplo, a resistência à compressão e a durabilidade — frente aos diversos mecanismos químicos e físicos de degradação do ambiente — são consideravelmente influenciadas pelo tipo de cimento utilizado na produção do material (GJØRV, 2014; NEVILLE; BROOKS, 2010; REBMANN, 2011).

Uma excelente forma de avaliar essa e a interferência de outros materiais nas propriedades do concreto, é através do estudo de dosagem do mesmo. Segundo Helene e

¹As adições minerais são materiais geralmente silicosos finamente moídos misturados aos cimentos ou concretos, em quantidades apreciáveis (mais de 5% da massa do cimento), que alteram suas propriedades. São exemplos: cinza volante, sílica ativa, escória de alto forno e fíler calcário (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Mais detalhes sobre as adições serão apresentados na Seção 2.2.

Tutikian (2022), no Brasil, ainda não há um texto consensual de como deve ser tal estudo, levando muitos pesquisadores a proporem os seus próprios métodos de dosagem, às vezes confundidos com uma recomendação da instituição para a qual trabalham ou através da qual foram publicados, a exemplo dos métodos da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON).

Apesar das diferenças entre os vários métodos de dosagem existentes, todos eles são baseados em fundamentos científicos e tecnológicos, juntamente com uma parte experimental em laboratório ou em campo. Assim, é possível tornar o processo de dosagem mais racional e otimizar a proporção dos materiais constituintes do concreto (HELENE; TUTIKIAN, 2022; RODRIGUES, 1998).

Tendo em vista a vantagem de realizar um estudo de dosagem racional e a variedade de cimentos existente, o presente trabalho propõe um análise acerca da influência dos diferentes tipos de cimento Portland no preparo de concretos convencionais aplicados em obras comuns. Tal estudo será direcionado à confecção das curvas de dosagem dos concretos, obtidas pelo método do IBRACON, para observar as alterações provocadas nos parâmetros de dosagem em função do tipo de cimento empregado.

1.1 JUSTIFICATIVA

O concreto está sujeito a ação de uma variedade de agentes agressivos a depender dos seus materiais constituintes e do seu ambiente de exposição, somado ao fato de ser comum uma estrutura de concreto estar ameaçada simultaneamente por mais de um tipo de mecanismo de deterioração. Além disso, medidas para otimizar o desempenho da durabilidade do concreto muitas vezes se encontram em conflito com as exigências estruturais de resistência e trabalhabilidade, por exemplo, o que dificulta a especificação e a dosagem do material (DYER, 2014).

Ainda, a depender da agressividade do meio ou do método construtivo, o uso de um tipo de cimento é mais indicado que o outro. O emprego do CP III é interessante em meios sulfatados, como os ambientes marinhos, pela contribuição da sua menor quantidade de Ca(OH)_2 presente no material hidratado. O CP V-ARI, por ser mais fino e rico em C_3S , é recomendado quando necessita-se de alta resistência mecânica inicial, caso da indústria de pré-moldados. Já o CP IV, é bastante recomendado no combate à reação álcali-agregado, graças à grande quantidade de pozolana presente neste cimento (PRUDÊNCIO JR, 2017; HASPARYK, 2022).

Contudo, uma vez que a maioria dos concretos utilizados nas obras é usinado, isto é, proveniente de central dosadora, e esta, por sua vez, geralmente opera com apenas um tipo de cimento na sua linha de produção, torna-se difícil, ou ao menos demorada, a elaboração de um novo traço quando é exigência do projeto o uso de um tipo de cimento diferente daquele de linha da concreteira, ou logo que ocorrem incidentes com o

fornecimento do material por parte das cimenteiras (p.e. falta de estoque ou manutenção dos fornos), provocando a rápida substituição do cimento.

A NBR 12655 ABNT (2022a) estabelece que um novo cálculo de dosagem deve ser refeito toda vez que houver mudança de marca, tipo ou classe do cimento. Mas pode ser oneroso realizar uma nova dosagem quando não se dispõe de tempo hábil, independentemente do método empregado ou do material substituído, pois é indispensável o prazo de 28 dias para o concreto atingir a sua resistência característica.

A norma supracitada também evidencia que a composição do concreto de classe C20 ou superior precisa ser definida em dosagem racional ou experimental. Embora sendo justas essas condições pensando na confiabilidade estrutural, sua aplicabilidade pode restringir ou mesmo inviabilizar o uso do concreto em locais onde não existem centrais dosadoras ou laboratórios capacitados para realizar os estudos de dosagem.

Os dois processos racionais de formulação de concreto mais conhecidos e usados no Brasil atualmente são os métodos da ABCP e do IBRACON (outrora conhecido como método do IPT/EPUSP). O primeiro é mais simples, porque é possível obter um traço piloto a partir de tabelas e ábacos pré fixados, restando apenas testá-lo em laboratório acerca da trabalhabilidade e resistência. O segundo é mais complexo e exige uma parte experimental maior, porém é mais preciso, pois seu desenvolvimento leva em consideração as características e propriedades dos materiais que serão de fato utilizados na fabricação do concreto (ABCP, 2020; HELENE; TUTIKIAN, 2022).

Diante do exposto, esta pesquisa toma o CP II-F-40 como referência — por se tratar do cimento mais usado nas concreteiras da região da Grande Florianópolis — e propõe o estudo completo de dosagem do concreto, segundo o método proposto pelo IBRACON, desde a caracterização física dos agregados e a identificação das principais propriedades do cimento e do aditivo utilizados, até a plotagem das curvas de dosagem. O mesmo processo se repete considerando os outros tipos de cimento selecionados para este trabalho: CP II-F-32, CP IV-32-RS e CP V-ARI.

Finalmente, são obtidos quatro diagramas de dosagem típicos de uma família de concreto de mesmos materiais (agregados, água e aditivo) e mesma consistência, porém cada um relativo a um tipo de cimento, os quais permitem, por meio do equacionamento matemático e do gráfico, estimar um traço piloto a partir da demanda de substituição do cimento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é contribuir para o entendimento da influência do tipo de cimento Portland na dosagem de concretos convencionais aditivados através da obtenção das curvas de dosagem pelo método do IBRACON, bem como da análise dos

principais parâmetros envolvidos no processo.

Aqui, entende-se como concreto convencional aquele sem qualquer característica ou propriedade especial, utilizado em obras corriqueiras da construção civil.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Entender, nos seus detalhes, o processo e os parâmetros envolvidos no método IBRACON de dosagem de concreto;
- Aplicar o método, de forma prática, para a formulação de concretos cujo o tipo de cimento seja a única variável em termos de material constituinte;
- Analisar as alterações dos parâmetros de dosagem ao longo do procedimento;
- Plotar os diagramas de dosagem dos concretos, de mesma trabalhabilidade, referentes a cada tipo de cimento utilizado na pesquisa e avaliar o comportamento das curvas de Abrams, de Lyse, de Priszkulnik & Kirilos e do 4^o Quadrante;
- Auxiliar profissionais da tecnologia do concreto, a partir dos resultados encontrados, na elaboração do traço de um concreto em função do tipo de cimento empregado de maneira mais ágil e precisa, promovendo economia de tempo e de custo.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em seis capítulos. No capítulo 1 são descritos o objetivo geral do trabalho, os objetivos específicos e a justificativa acerca de sua realização. Nos capítulos 2 e 3 são contemplados os assuntos necessários para compreensão do estudo proposto. São eles: *cimento Portland* e *dosagem do concreto*. No capítulo 4 mostra-se o método proposto e os materiais utilizados. No capítulo 5 são apresentados os resultados e propõe-se uma discussão acerca das análises obtidas. No capítulo 6 conclui-se o estudo e apresentam-se as limitações encontradas no desenvolvimento da pesquisa e as recomendações para futuros trabalhos. Por fim, apresentam-se as referências consultadas no estudo, os anexos e os apêndices.

2 CIMENTO PORTLAND

A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso e cal. As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água. Por fim, os romanos produziram um cimento de notável durabilidade, ao acrescentarem cinzas vulcânicas às argamassas de argila e cal (BATTAGIN; BATTAGIN, 2017).

Os mesmos autores relatam que, já na metade do século XVIII, o inglês John Smeaton conseguiu obter um produto de alta resistência por meio da calcinação de calcários moles e argilosos, empregado na reconstrução do Farol de Eddystone, uma obra emblemática em seu tempo

Considerando o baixo intercâmbio científico da época e o desconhecimento dos experimentos de Smeaton, o francês Louis J. Vicat, em 1818, obteve resultados semelhantes ao a misturar artificialmente calcários e componentes adequados de argila em proporções ideais para obtenção de cimento. Ele é considerado o pai do cimento artificial.

Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou pedras calcárias e argila juntas, transformando-as num pó fino. Percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas calcárias da ilha britânica de Portland (NEVILLE; BROOKS, 2010).

2.1 FABRICAÇÃO

O Cimento Portland é um ligante hidráulico¹ produzido pela pulverização de clínqueres constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos cristalinos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio, em proporções que variam aproximadamente de 3% a 5% em massa, e eventuais adições ativas facultativas, conforme o tipo de cimento, durante o processo de fabricação (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.1 Matérias-primas

Prudêncio Jr (2017) cita e comenta as funções das três principais matérias-primas formadoras do clínquer:

¹Os ligantes hidráulicos endurecem e desenvolvem resistência mecânica exclusivamente a partir da sua hidratação e mantém suas propriedades quando imersos na água. Diferente dos aglomerantes aéreos, que podem endurecer por reações de hidratação ou pela reação com o CO₂ presente no ar. Estes já não resistem satisfatoriamente imersos em água.

- **Calcário:** o calcário calcítico é formado predominantemente por carbonato de cálcio (CaCO_3) e se apresenta na natureza com impurezas, como o óxido de magnésio cujo teor não deve ser elevado por conduzir a cimentos com características expansivas. Este composto é a principal fonte de óxido de cálcio (CaO), sendo a base para a formação;
- **Argila:** material essencialmente constituído por silicato de alumínio hidratado, geralmente contendo ferro e outros minerais em menores porcentagens. A argila fornece os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 que contribuirão na formação dos silicatos e aluminatos, os quais são os responsáveis pela resistência mecânica dos cimentos após a hidratação;
- **Gesso:** é o produto de adição final no processo de fabricação do cimento Portland, com a finalidade de regular o tempo de pega por ocasião das reações de hidratação. A gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é o tipo de gesso mais empregado.

2.1.2 Obtenção do clínquer

Genericamente, pode-se afirmar que o clínquer é formado por 75% a 80% de calcário e por 20% a 25% de argila. Estes materiais passam por um processo de britagem, pré-homogenização, moagem e homogenização, que são etapas do processo que permitem que o material resultante, chamado de farinha, apresente a composição química preestabelecida e uma finura adequada para uma boa combinação dos seus constituintes (BATTAGIN, 2022).

A mistura e a moagem das matérias-primas podem ser feitas tanto com uso de água como em condição seca: daí surgem as denominações do processo por via úmida e por via seca. No primeiro, a homogenização da farinha é realizada na forma de uma lama contendo 30% a 40% de água, mas é pouco utilizado no Brasil devido ao alto custo energético despendido comparado ao processo por via seca. Este, por sua vez, constitui a moagem a seco dos materiais, gerando a farinha crua e consome cerca da metade do poder calorífico necessário para um forno via úmida (BATTAGIN, 2022; MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE; BROOKS, 2010).

A farinha é então levada a um forno rotativo cuja temperatura pode alcançar 1500°C , onde uma parte do material é sinterizada e fundida no seu interior, tomando a forma de esferas com diâmetros da ordem de 10 mm a 30 mm, conhecidas como clínqueres (NEVILLE; BROOKS, 2010).

O final do processo de fabricação do cimento Portland consiste na pulverização dessas esferas (clínquer) em partículas de diâmetro médio entre $10\ \mu\text{m}$ e $15\ \mu\text{m}$. A operação é feita em moinhos de bolas e conta também com a adição da gipsita (sulfato de cálcio) para ser moída junto com o clínquer (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.3 Composição química

Segundo Prudêncio Jr (2017), durante a formação do clínquer, a sílica, a alumina, o óxido de ferro e o óxido de cálcio, reagem e dão origem aos seus principais compostos:

- **Silicato tricálcico (C_3S):** é o composto essencial do cimento Portland, responsável pela resistência inicial. Reage em poucas horas em contato com a água, liberando grande quantidade de calor;
- **Silicato dicálcico (C_2S):** possui pega lenta e baixa resistência até os 28 dias, mas que aumenta a patamares da resistência do C_3S no primeiro ano. A vantagem é que esse composto possui baixo calor de hidratação;
- **Aluminato tricálcico (C_3A):** possui pega instantânea desenvolvendo altíssimo calor de hidratação. Tem baixa resistência mecânica e não resiste à ação de águas sulfatadas. Evidentemente, sua quantidade deve ser pequena devido aos inconvenientes citados. No entanto, a presença da alumina é importante na fase de produção do cimento, pois ela age como fundente e facilita a formação do clínquer a temperaturas mais baixas.
- **Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF):** tem pega rápida, porém não instantânea como a do C_3A . Possui baixa resistência, mas a presença do Fe_2O_3 também serve como fundente, além de também fixar parte da alumina, melhorando o desempenho do cimento ao ataque de águas sulfatadas.

Esses compostos formam-se no interior do forno quando a temperatura se eleva a ponto de transformar a farinha crua em um líquido pastoso que, ao resfriar-se, dá origem a substâncias cristalinas, como ocorre com os três primeiros produtos anteriormente citados, e um material intersticial amorfo, o C_4AF . Todos eles têm a propriedade de reagir em presença de água, por hidrólise, formando então os produtos hidratados.

2.2 ADIÇÕES MINERAIS

São denominados adições, os materiais que, misturados aos cimentos ou concretos em quantidades apreciáveis (maior do que 5% em massa), alteram as propriedades que o aglomerante confere ao concreto. No Brasil, a quase totalidade dos cimentos comercialmente disponíveis possuem um ou mais tipos de adição. O uso dessas adições, além de trazerem vantagens sobre o cimento Portland puro, está relacionada à durabilidade e a razões ambientais, contribuindo para a diminuição de emissões de gases do efeito estufa, evitando que as jazidas de calcário sejam exauridas prematuramente e contribuindo para a reciclagem de rejeitos industriais, no caso das escórias e pozolanas (BATTAGIN, 2022; PRUDÊNCIO JR, 2017).

A seguir é apresentada uma breve descrição dos principais tipos de adições empregadas nos cimentos brasileiros, conforme relatam Prudêncio Jr (2017) e Battagin (2022).

2.2.1 Pozolanas

Pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos, que por si só possuem pouco ou nenhum valor aglomerante. Entretanto, quando finamente divididos e em presença de umidade, reagem quimicamente com hidróxido de cálcio, à temperatura normal, formando compostos com propriedades aglomerantes (silicatos de cálcio hidratados), porém distintos daqueles originados do clínquer, pois têm menor relação CaO/SiO_2 , portanto menos básicos e, por esta razão, mais estáveis aos meios agressivos. Os materiais pozolânicos são empregados na fabricação de alguns cimentos brasileiros, como o CP IV e o CP II-Z.

Dentro desta definição, enquadram-se uma série de materiais:

- Pozolanas naturais: algumas terras diatomáceas, rochas contendo opala, tufos e cinzas vulcânicas;
- Pozolanas artificiais: obtidas pela calcinação de argilas e xistos argilosos;
- Cinzas volantes: resultantes da combustão de carvão mineral, usualmente das usinas termoelétricas;
- Cinzas de origem Vegetal: obtidas pela queima de produtos vegetais (casca de arroz, palha de cana, etc);
- Sílica ativa: resíduo da produção do ferro silício ou silício metálico.

2.2.2 Escórias de alto forno

Este é um resíduo da produção de ferro gusa. Quimicamente, trata-se de uma mistura de óxido de cálcio, sílica e alumina, que são os mesmos óxidos que compõem o clínquer, mas em proporções distintas. Para uso como adição em cimentos, necessita ser resfriada bruscamente para que se solidifique como material vítreo.

As escórias atuam quimicamente de modo distinto das pozolanas. São, isoladamente, um aglomerante de baixíssima reatividade, ou seja, em contato com a água reagem formando compostos hidratados complexos, mas de natureza similar aos da hidratação do cimento Portland (CSH) e em uma velocidade muito lenta. Para acelerar as reações de hidratação, necessitam de um ambiente fortemente alcalino e de uma granulometria extremamente fina. O composto está presente principalmente no cimento do tipo CP III, em proporções que variam entre 35% e 70%.

2.2.3 Filers

O fíler é um material finamente moído, com aproximadamente a mesma finura do cimento portland, mas que, devido a suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto, tais como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade e exsudação.

Os filers mais utilizados na fabricação dos cimentos são provenientes da moagem do calcário, portanto, de composição a base de carbonato de cálcio. Podem ativar a hidratação do cimento Portland atuando como pontos de nucleação. Devido ao seu baixo custo e disponibilidade, são empregados em praticamente todos os cimentos comerciais brasileiros, em proporções entre 5% e 10%.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS CIMENTOS NACIONAIS

A NBR 16697 ABNT (2018a) apresenta seis tipos de cimentos normalizados, sendo que alguns se subdividem, totalizando dez variedades, como pode ser consultado no Quadro 1. Cabe ressaltar que a disponibilidade de certos tipos de cimento é regional e alguns só são fabricados segundo encomendas especiais.

Quadro 1 – Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b –
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 ^c	
	Não estrutural	CPB	–	–

^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^c As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018a).

Já o Quadro 2 e o Quadro 3 apresentam os limites de composição, em relação às quantidades de adições minerais, de cada um dos tipos de cimento Portland normalizados, e os seus requisitos físicos e mecânicos, respectivamente.

Quadro 2 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa).

Designação normalizada		Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clinker + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum		CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5		
		CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno		CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
Cimento Portland composto com material pozolânico		CP II-Z			71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Cimento Portland composto com material carbonático		CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25
Cimento Portland de alto fomo		CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Cimento Portland pozolânico		CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V ^a			ARI		90 – 100	0
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40		75 – 100	–	–	0 – 25
	Não estrutural		–	–	50 – 74	–	–	26 – 50
^a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.								

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018a).

Quadro 3 – Requisitos físicos e mecânicos dos cimentos Portland.

Sigla ^a	Classe	Finura	Tempo de início de pega	Expansibilidade a quente	Resistência à compressão MPa				Índice de brancura
		Resíduo na peneira 75 μm			1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
		%	min	mm					–
CP I	25	$\leq 12,0$	≥ 60	≤ 5	–	$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	–
CP I-S	32	$\leq 12,0$	≥ 60	≤ 5	–	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$	
CP II-E									
CP II-F	40	$\leq 10,0$	≥ 60	≤ 5	–	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	$\geq 40,0$	
CP III	25	$\leq 8,0$	≥ 60	≤ 5	–	$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	–
	CP IV	32	$\leq 8,0$	≥ 60	≤ 5	–	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$
	40	$\leq 8,0$	≥ 60	≤ 5	–	$\geq 12,0$	$\geq 23,0$	$\geq 40,0$	–
CP V	ARI	$\leq 6,0$	≥ 60	≤ 5	$\geq 14,0$	$\geq 24,0$	$\geq 34,0$	–	–
CPB Estrutural	25	$\leq 12^b$	≥ 60	≤ 5		$\geq 8,0$	$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	≥ 78
	32	$\leq 12^b$	≥ 60	≤ 5		$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	$\geq 32,0$	
	40	$\leq 12^b$	≥ 60	≤ 5		$\geq 15,0$	$\geq 25,0$	$\geq 40,0$	
CPB Não estrutural	–	$\leq 12,0^b$	≥ 60	≤ 5	–	$\geq 5,0$	$\geq 7,0$	$\geq 10,0$	≥ 82

^a Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes a sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.

^b Resíduo na peneira 45 μm .

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018a).

A seguir, são feitos breves comentários a respeito da composição e da recomendação do uso dos tipos de cimentos apresentados pela NBR 16697 ABNT (2018a).

2.3.1 CP I e CP I-S

Este aglomerante é obtido pela moagem do clínquer com adição de sulfato de cálcio. No caso do CP I-S, pode adicionar-se até 5% de escória, pozolana ou fíler calcário. Ele é utilizado em casos correntes, onde não se exige nenhuma propriedade especial do concreto.

2.3.2 CP II (E, Z ou F)

O CP II difere do CP I-S apenas quanto à quantidade de adição utilizada na sua formulação, a qual é ligeiramente maior. Sua aplicação é a mesma que a do tipo anterior.

A presença das adições em quantidades relativamente baixas faz com que apresentem resistência e durabilidade similares às do cimento CP I-S.

2.3.3 CP III

O CP III é um cimento obtido pela moagem de clínquer Portland com adição de escória granulada de alto-forno, com eventual adição de sulfato de cálcio. O conteúdo de escória deve estar compreendido entre 35% e 70% da massa total. Este cimento produz resistências iniciais mais baixas que o cimento Portland comum, principalmente sob baixas temperaturas, e desenvolve menor calor de hidratação.

Tem seu emprego generalizado em obras de concretos simples, armado e protendido, apesar de possuir aplicações específicas mais interessantes, como é o caso de meios sulfatados (ambientes marinhos e certas águas residuais industriais), sendo sua resistência à esses meios aumentada pela menor quantidade de hidróxido de cálcio presente no material hidratado. Recomenda-se sua utilização também em concreto massa ou estruturas cujas dimensões facilitam o aparecimento de fissuras de origem térmica.

2.3.4 CP IV

O CP IV é obtido pela moagem do clínquer Portland com adição de pozolana, sem adição, durante a moagem, de outra substância a não ser do sulfato de cálcio, estando a quantidade de pozolana empregada entre de 15% a 50%.

Nas primeiras idades, apresenta desenvolvimento mais lento das resistências mecânicas, comparados a concretos de cimento Portland comum, o que tende a inverter se em idades superiores a 90 dias. Além disso, desenvolvem baixo calor de hidratação, produzem argamassas e concretos mais impermeáveis pela fixação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na reação pozolânica, inibem a reação entre os álcalis do cimento e agregados reativos e apresentam um melhor desempenho à cura térmica (utilizada na fabricação de pré-moldados).

O emprego do cimento Portland Pozolânico é especialmente interessante no caso de concretos sujeitos à lixiviação sob águas agressivas, uma vez que apresenta menor permeabilidade, comparativamente aos confeccionados com cimento comum e apresentam boa resistência a sulfatos. Recomenda-se sua utilização também em concreto massa ou estruturas cujas dimensões propiciem o aparecimento de fissuras de origem térmica.

2.3.5 CP V

Este cimento é obtido pela moagem do clínquer com sulfato de cálcio, podendo receber a adição de até 5% de filer calcário. Sua elevada resistência inicial é obtida geralmente pela maior finura, uma vez que a mudança de composição do clínquer para torná-lo mais rico em C_3S é operacionalmente complicada para as fábricas de cimento.

O emprego deste aglomerante é recomendado quando necessita-se de resistências mecânicas elevadas a baixas idades. Por norma, exige-se que apresente, com 1 dia de idade, resistência à compressão superior a do cimento Portland comum aos 3 dias. Assim, este cimento tem grande aplicação na indústria de pré-moldados, onde a necessidade de rápida reutilização de formas exige o desenvolvimento acelerado de resistências em idades precoces.

Contudo, não deve ser empregado em concreto massa e elementos de grandes dimensões, dado o elevado calor de hidratação por ele gerado. Também não é recomendado seu emprego em ambientes agressivos pela grande quantidade de Ca(OH)_2 liberada na hidratação, a não ser que apresente resistência a sulfatos (prefixo -RS) por menor quantidade de C_3A presente no clínquer.

2.3.6 CP Branco

Este tipo de cimento possui esta coloração branca por advir de uma mistura de calcário e caulim, sem praticamente conter óxidos de ferro e manganês. Logo, é um cimento de fabricação bastante pequena e tem seu preço superior ao dos outros cimentos Portland por exigir um consumo energético maior na produção e fornos especiais com revestimento refratário mais caro.

O CPB é classificado em dois grupos: estrutural e não-estrutural. O primeiro grupo apresenta exigências quanto a resistências mecânicas semelhantes ao cimento Portland comum. É aplicado em obras especiais onde se deseja um efeito arquitetônico diferenciado pela sua cor. O segundo grupo é utilizado principalmente para composição de pastas de rejunte de elementos cerâmicos.

3 DOSAGEM DO CONCRETO

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A dosagem do concreto de cimento Portland é o processo de obtenção da melhor proporção entre os materiais constituintes do concreto, que satisfaça os requisitos de desempenho pré-determinados ao menor custo possível. Ou seja, os materiais selecionados, além de adequados, devem estar disponíveis no mercado a preços razoáveis de produção e transporte. Considera-se uma gama de materiais passíveis de uso nos concretos: os vários tipos de cimentos, os agregados miúdos e graúdos, a água, o ar incorporado e o ar aprisionado, os aditivos químicos, as adições minerais, os pigmentos e as fibras.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), definir essa proporção ideal de materiais, não é uma tarefa simples. Mesmo existindo fundamentos técnico-científicos que norteiam os procedimentos de dosagem do concreto, é possível afirmar que tal processo não está inteiramente no campo da ciência, pois sempre envolve uma parte experimental em laboratório e/ou campo. Embora muitos engenheiros não se sintam à vontade com assuntos que não possam ser reduzidos a fatores numéricos, com conhecimento dos princípios fundamentais e com alguma prática, o ato de dosar o concreto pode ser dominado e muito compensador, já que os efeitos da dosagem no custo do concreto e em importantes propriedades, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, podem ser claramente percebidos.

O desafio torna-se mais difícil quando uma propriedade desejada do concreto pode ser afetada negativamente pela alteração de uma outra, como a adição de água a uma mistura, para uma quantidade fixa de cimento, melhorando a fluidez do concreto no estado fresco mas, paralelamente, diminuindo sua resistência uma vez no estado endurecido. Esse e outros conflitos demonstram que não há sempre uma receita a ser seguida, cada caso é analisado em particular e o tecnologista de concreto deve conciliar as exigências dos projetistas por meio de um concreto o mais econômico possível.

Priszkulnik (1977 apud BOGGIO, 2000) estabelece que a obtenção de um concreto deve atender as seguintes condições:

- a) No estado fresco: seja trabalhável e mantenha a sua homogeneidade nas etapas de mistura, transporte, lançamento e adensamento;
- b) No estado endurecido: presente, na idade especificada, as propriedades exigidas no projeto estrutural (resistências mecânicas, retração, deformação lenta) acordes com as especificações de cálculo e a aparência exigida no projeto arquitetônico;
- c) Seja durável, mantendo suas propriedades ao longo da vida útil prevista para a estrutura, resistindo pois, a eventuais efeitos danosos oriundos de reações entre os seus componentes, e das ações físicas e químicas do meio;
- d) Seja econômico.

As principais propriedades do concreto endurecido são normalmente expressas pelo projetista estrutural, enquanto que as propriedades do concreto no estado fresco são determinadas pelos equipamentos e técnicas de execução — transporte, lançamento e adensamento do concreto —, bem como pelas próprias características geométricas da estrutura a ser concretada (HELENE; TUTIKIAN, 2022).

3.2 PRINCÍPIOS BÁSICOS

3.2.1 Dosagem racional e experimental

Para encontrar a proporção (traço) ideal dos materiais para uma dado concreto, pode-se recorrer a dois processos: a dosagem empírica ou a dosagem racional e experimental.

A primeira é feita baseada em valores médios prefixados, na tradição ou a partir de experiências anteriores do construtor. Trata-se, evidentemente, de uma maneira inadequada de proporcionar o concreto. Contudo, é comum a adoção dessa metodologia em obras de pequeno vulto e/ou longe de grandes centros, onde não é possível recorrer a análises nem equipamentos necessários para a elaboração de um estudo mais detalhado do concreto. Cabe ao engenheiro responsável atentar-se à qualidade dos materiais que serão empregados e verificar as propriedades mecânicas do concreto obtido antes da sua aplicação em obra (BOGGIO, 2000; PETRUCCI, 1993; PRUDÊNCIO JR, 2017).

Ainda, a norma NBR 12655 (ABNT, 2022a) estabelece que a dosagem empírica só pode ser utilizada para produzir concretos das classes C10 e C15, com consumo mínimo de 300 kg de cimento por metro cúbico de concreto. Logo, essa limitação impede o uso da dosagem empírica para concretos estruturais, uma vez que a norma NBR 8953 (ABNT, 2015) especifica o valor de 20 MPa como resistência característica à compressão mínima.

Já a dosagem racional e experimental, segundo Boggio (2000), baseia-se em regras e procedimentos práticos deduzidos de leis científicas e fundamentados em ensaios experimentais. O termo **racional** utilizado, parte do entendimento que esse processo de dosagem é estruturado logicamente de forma a estabelecer uma sequência de atividades que possibilitam atingir o traço desejado.

O mesmo autor ainda indica que a palavra **experimental** refere-se à necessidade de confirmar e aumentar, através de ensaios e tentativas, o conhecimento sobre o concreto preparado, cujas proporções são inicialmente determinadas de acordo com as leis e os princípios considerados. Além disso, no desenvolvimento de uma dosagem experimental, é frequente a realização de ensaios prévios de qualificação dos materiais que serão utilizados e também a elaboração de testes para avaliar as diferentes alternativas de proporção, visando verificar o atendimento das exigências de trabalhabilidade e resistência requeridas do concreto final a ser produzido.

3.2.2 Relação compacidade vs. resistência

Considera-se que o primeiro estudo de proporção racional dos materiais que compõem os concretos e argamassas foi feito por René Ferét, na época chefe do laboratório de *Ponts et Chaussées*, na França. Em 1892, o pesquisador francês apresentou a lei fundamental que relaciona a resistência da argamassa com a sua compacidade. Estudando misturas com mesmo cimento, areia, idade e condições de cura, Ferét verificou, experimentalmente, que a resistência à compressão de argamassas é em função somente da relação do volume absoluto de água mais o volume absoluto de vazios da argamassa (HELENE; TERZIAN, 1992; CHIDIAC; MOUTASSEM; MAHMOODZADEH, 2013). Esta correlação é expressa pela Equação (1).

$$f_{mj} = A \left(\frac{V_c}{V_c + V_w + V_a} \right)^B \quad (1)$$

onde:

- f_{mj} = resistência a compressão da argamassa na idade de j dias;
- A, B = constantes particulares;
- V_c, V_w, V_a = volume de cimento, água e areia, respectivamente.

3.2.3 Relação água/cimento vs. resistência

Como apresentado anteriormente, a *dosagem racional e experimental* é baseada em uma série de fundamentos já consolidados na literatura por pesquisadores e tecnologistas do concreto ao redor do globo. Dentre esses fundamentos, é seguro afirmar que o princípio mais importante a ser considerado na dosagem do concreto é a influência da relação água/cimento (a/c) na resistência à compressão.

Em 1918, o engenheiro norte-americano Duff A. Abrams, após o ensaio de inúmeros traços e análise de mais de 50.000 corpos de prova, enunciou a seguinte lei que leva o seu nome: “Dentro do campo dos concretos plásticos, a resistência aos esforços mecânicos, bem como as demais propriedades do concreto endurecido, variam na razão inversa da relação água/cimento.” (HELENE; TUTIKIAN, 2022; PETRUCCI, 1993). A Lei de Abrams, mundialmente aceita até os dias de hoje, é expressa pela Equação (2):

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{(a/c)}} \quad (2)$$

onde:

- f_{cj} = resistência a compressão do concreto na idade de j dias;
- a/c = relação em massa de água/cimento;
- k_1, k_2 = constantes particulares.

Por volta de 1923, Draffin (1943 apud HELENE; TERZIAN, 1992) relata que dois pesquisadores da Universidade de Illinois (EUA) questionaram a abrangência do modelo de Abrams, o qual afirmava ser a resistência do concreto determinada somente pela relação entre o volume de cimento e o de água. Talbot e Richart defendiam que a magnitude do total de vazios no concreto — os espaços ocupados pela água e pelo ar — era o que determinava a resistência final, hipótese comprovada atualmente. Logo, a teoria universal de Abrams possui suas limitações, requerendo pequenos ajustes quando se trata de concretos com consistência seca ou com alto teor de ar incorporado.

3.2.4 Água total vs. trabalhabilidade

É quase aceita por unanimidade dos pesquisadores a chamada Lei de Lyse, apresentada em 1932 pelo engenheiro norueguês Inge Lyse ao demonstrar que, dentro de certos limites e mantidos os mesmos materiais, é possível considerar a massa de água por unidade de volume de concreto como a principal determinante da consistência do concreto fresco, qualquer que seja a proporção dos demais materiais da mistura. Em outras palavras, a quantidade total de água é praticamente constante para concretos com uma dada trabalhabilidade independentemente do traço ($1 : m$) (PETRUCCI, 1993; ASSUNÇÃO, 2002).

A Lei de Lyse é expressa pela Equação (3) em sua forma original, pela Equação (4) em sua forma analítica e representada graficamente pela Figura 1:

$$m = k_3 + k_4 \cdot \frac{a}{c} \quad (3)$$

$$x = \frac{H}{100} \cdot (1 + m) \quad (4)$$

onde:

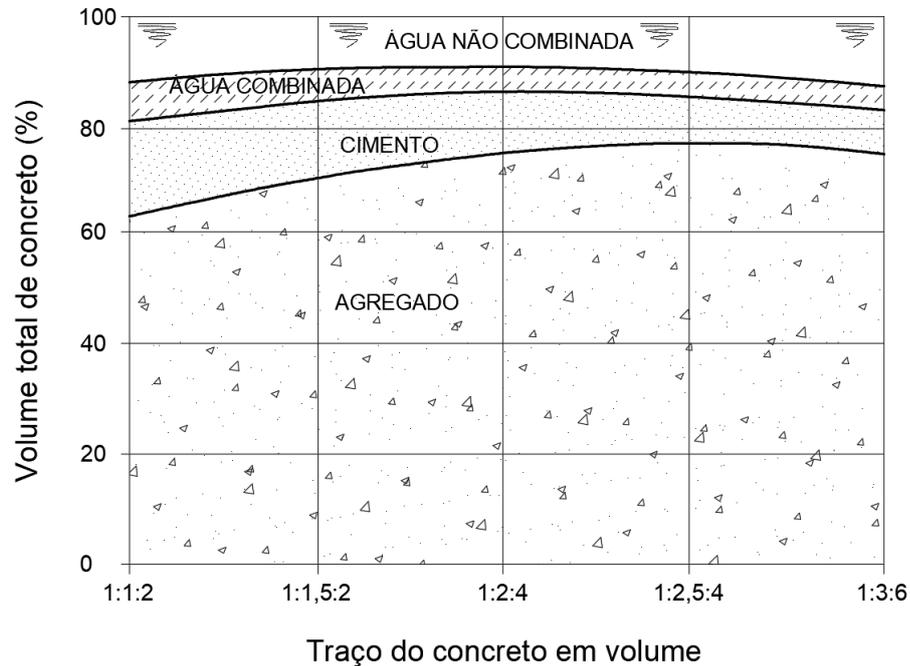
$a/c, x$ = relação em massa de água/cimento;

H = relação água/materiais secos;

k_3 e k_4 = constantes particulares;

m = relação em massa seca de agregados/cimento.

Figura 1 – Representação esquemática da Lei de Lyse para concretos com mesma consistência.



Fonte: adaptado de (PETRUCCI, 1993).

3.2.5 Consumo de cimento vs. quantidade de agregados

A pesquisa nacional também teve grande participação no estudo da dosagem do concreto. Em 1974, Simão Prizskulnik e José Pedro Kirilos, pesquisadores do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo), introduziram o diagrama de dosagem (Figura 2) nos estudos da proporção do concreto. Ele representa o modelo de comportamento de uma família de concretos confeccionados com uma dada consistência, mas com propriedades diferentes depois de endurecidos, e compostos com materiais de mesma natureza. A compreensão do diagrama de dosagem será mais detalhada na Seção 3.4.3 deste capítulo.

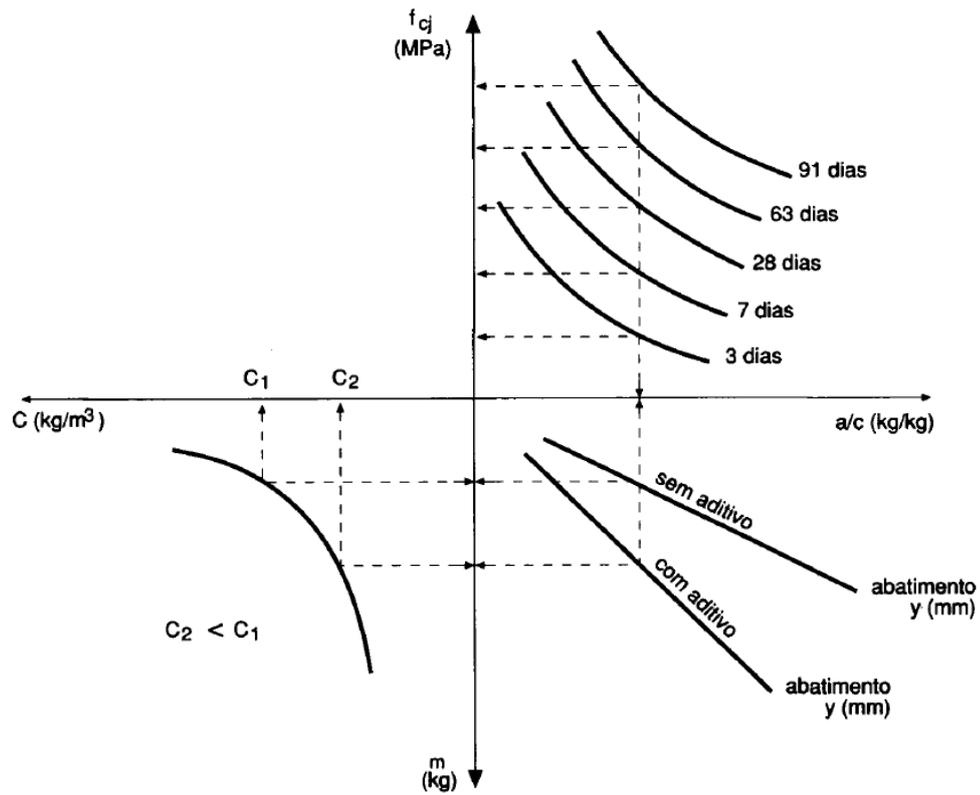
Os estudiosos ainda demonstraram que: “o consumo de cimento por metro cúbico de concreto varia na proporção inversa da relação em massa seca de agregados/cimento (m).” (HELENE; TUTIKIAN, 2022). Tal conclusão é conhecida como a Lei de Prizskulnik & Kirilos e é representada matematicamente pela Equação (5).

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \cdot m} \quad (5)$$

onde:

- C = consumo de cimento por m^3 de concreto;
- m = relação em massa seca de agregados/cimento;
- k_5 e k_6 = constantes particulares.

Figura 2 – Diagrama de dosagem dos concretos de cimento Portland.



Fonte: Helene e Terzian (1992)

Para resumir cronologicamente a evolução nacional e internacional dos métodos de dosagem e das contribuições acerca do assunto, a Tabela 1 traz uma síntese do exposto.

Tabela 1 – Síntese cronológica das principais contribuições à dosagem de concretos.

Pesquisador	Ano	Contribuição
René Ferét	1892	Lei fundamental de correlação entre resistência e compacidade.
Duff Abrams	1918	Lei da correlação entre resistência e relação a/c; módulo de finura; cone de abatimento para medir a consistência.
Ary Torres	1927	Método do IPT.
Inge Lyse	1932	Importância da água por unidade de volume de concreto na definição da sua consistência.
Lobo Carneiro	1937	Método de dosagem do INT com base nas curvas de Bolomey.
Eládio Petrucci	1951	Método de dosagem do ITERS.
Priszkulnik & Kirilos	1974	Introdução do diagrama de dosagem nos estudos de dosagem dos concretos.
Públio Rodrigues	1984	Método da ABCP (revisado em 1995) adaptado do método da ACI 211.1 .
Helene & Terzian	1992	Manual de dosagem e controle dos concretos no Brasil (método do IPT/EPUSP).

Fonte: adaptado de Helene e Tutikian (2022).

3.2.6 Traço

A maneira de exprimir a composição de uma mistura de concreto é chamada de *traço*, podendo este ser indicado pelas proporções em peso (mais comum) ou em volume dos materiais. Seja qual for a forma indicada, toma-se sempre o cimento como unidade e relacionam-se as demais quantidades à sua (PETRUCCI, 1993).

Três notações do traço em peso, referido a um quilo de cimento, são mostradas a seguir. A primeira notação é conhecida como *traço bruto*, no qual m simboliza a soma total dos agregados. A segunda e a terceira notação denominam-se *traço desdobrado*, onde é possível identificar as proporções do agregado miúdo (a) e do graúdo (p) separadamente, além da relação água/cimento (x). Os índices numéricos observados na terceira expressão são empregues no caso de se utilizar mais de um tipo de agregado miúdo e/ou graúdo na composição da mistura.

$$\begin{aligned}
 &1 : m \\
 &1 : a : p : x \\
 &1 : a_1 : a_2 : p_1 : p_2 : x
 \end{aligned}$$

Desta forma, tem-se a Equação (6):

$$m = a + p = a_1 + a_2 + p_1 + p_2 \quad (6)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 m &= \text{kg de agregado total por kg de cimento;} \\
 a &= \text{kg de agregado miúdo por kg de cimento;} \\
 p &= \text{kg de agregado graúdo por kg de cimento.}
 \end{aligned}$$

Vale ressaltar que essa é uma notação simplificada e mais utilizada para fins de cálculos nos procedimentos de dosagem. Na esfera comercial, o traço é apresentado de forma mais detalhada em um documento conhecido como *carta traço* (vide exemplo no Anexo A), no qual as proporções dos materiais aparecem, geralmente, em quilo por metro cúbico de concreto. As informações sobre os tipos e os fornecedores dos materiais também devem ser incluídas na carta. Além disso, com o avanço da tecnologia do concreto, outros elementos podem estar contidos na composição e expressão do traço, como quantidade de aditivos, de adições e os diferentes agregados utilizados.

3.2.7 Consumo de cimento

A quantidade de cimento utilizada por unidade de volume de concreto é o parâmetro mais importante da dosagem racional do concreto, pois seu consumo está diretamente ligado à resistência mecânica do produto final, à durabilidade e ao custo. Costumeiramente, o consumo de cimento é apresentado em quilo por metro cúbico de concreto (kg/m^3) e, para concretos estruturais, a (ABNT, 2022a) estabelece o valor mínimo de $260 \text{ kg}/\text{m}^3$.

O alto consumo de cimento, além de aumentar o custo, pode gerar alguns efeitos indesejáveis, visto ser diretamente proporcional a este parâmetro o aparecimento de fissuras por retração e o desprendimento de elevado calor de hidratação. Já a falta do aglomerante no concreto, leva, em termos gerais, a resultados baixos de resistência mecânica e aumento da porosidade e da permeabilidade, comprometendo a durabilidade do material e da estrutura executada (PRUDÊNCIO JR, 2017).

Conforme o *método do volume absoluto* proposto pela ACI (2022), um certo volume do concreto fresco é resultado da soma dos volumes absolutos dos seus constituintes (Equação (7)), isto é: cimento, areia, brita, ar incorporado e, eventualmente, adições minerais, fibras e aditivos.

Sendo a massa específica de um material a relação entre sua massa e seu volume e tomando 1 m^3 de concreto como referência, pode-se reescrever a Equação (7) na forma da Equação (8). Como o traço unitário do concreto é relativo à quantidade de cimento, divide-se esta equação pela massa de cimento e obtém-se Equação (10), considerando a massa específica da água igual a 1 kg/dm^3 e as relações da notação do traço em massa do concreto. Ao isolar a massa de cimento, encontra-se a Equação (11), utilizada para calcular o consumo de cimento (C) por metro cúbico de concreto.

$$V_c + V_a + V_p + V_w + V_{ar} = V_{ccp} \quad (7)$$

$$\frac{M_c}{\rho_c} + \frac{M_a}{\rho_a} + \frac{M_p}{\rho_p} + \frac{M_w}{\rho_w} + V_{ar} = 1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ dm}^3 \quad (8)$$

$$\frac{M_c}{\rho_c M_c} + \frac{M_a}{\rho_a M_c} + \frac{m_p}{\rho_p M_c} + \frac{m_w}{\rho_w M_c} + \frac{V_{ar}}{M_c} = \frac{1000}{M_c} \quad (9)$$

$$\frac{1}{\rho_c} + \frac{a}{\rho_a} + \frac{p}{\rho_p} + \frac{x}{1} = \frac{1000 - V_{ar}}{m_c} \quad (10)$$

$$M_c = C = \frac{1000 - V_{ar}}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{a}{\rho_a} + \frac{p}{\rho_p} + x} \quad (11)$$

onde:

$V_c, V_a, V_p, V_w, V_{ar}, V_{ccp}$ = volume do cimento, do agregado miúdo, do agregado graúdo; da água, do ar incorporado e do concreto fresco, respectivamente;

M_c, M_a, M_p, M_w = massa do cimento, do agregado miúdo, do agregado graúdo e da água, respectivamente, em kg;

$\rho_c, \rho_a, \rho_p, \rho_w$ = massa específica do cimento, do agregado miúdo, do agregado graúdo e da água, respectivamente, em kg/dm^3 ;

C = consumo de cimento por volume de concreto, em kg/m^3 .

A principal função do tecnologista de concreto é, através da dosagem racional do material, buscar o mínimo consumo de cimento (C) possível para uma dada resistência mecânica.

3.3 RESISTÊNCIA DE DOSAGEM

A resistência à compressão do concreto é um parâmetro que depende, dentre outros, da qualidade dos materiais empregados, das proporções da mistura, meios de produção e execução dos ensaios. Considerando que este parâmetro tem como referência os resultados obtidos de corpos de prova cujos valores são variáveis e dependentes da qualidade da produção do concreto, torna-se importante definir uma margem de segurança para garantir que a resistência desejada será alcançada de fato.

A resistência prevista para a dosagem não é, portanto, a resistência característica do concreto (f_{ck}) especificada no projeto estrutural, e sim o f_{cj} , definido pela NBR 12655 ABNT (2022a) através da Equação (12):

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \cdot s_d \quad (12)$$

onde:

- f_{ck} = resistência média do concreto aos j dias;
- f_{cj} = resistência característica do concreto aos j dias;
- s_d = desvio-padrão de dosagem.

Observa-se que tanto para o f_{ck} quanto para o f_{cj} , a idade j não é definida, cabendo ao projetista estrutural especificá-la. Porém, caso não o faça, subentende-se $j = 28$ dias.

A mesma norma brasileira anteriormente citada permite o fabricante calcular o próprio desvio-padrão quando o concreto for elaborado com os mesmo materiais, mediante equipamentos similares e sob condições equivalentes, a partir de um valor mínimo de resultados consecutivos de ensaios obtidos no intervalo de 30 dias. Entretanto, em hipótese alguma, o valor de s_d pode ser menor que 2 MPa.

Caso não se disponha de tal controle da produção do concreto, o Quadro 4 apresenta os valores do desvio padrão em função das condições de preparo do material.

Quadro 4 – Valores de s_d em função do rigor da produção do concreto.

s_d (MPa)	Condição	Classe	Descrição
4,0	A	C10 a C80	O cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados.
5,5	B	C10 a C20	O cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume, levando em conta a umidade da areia.
7,0	C	C10 a C15	O cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e a sua quantidade é corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados e da determinação da consistência do concreto.

Fonte: adaptado da NBR 12655 ABNT (2022a).

Ainda, devido à existência de uma forte correspondência entre a relação água/cimento, a resistência à compressão do concreto e a sua durabilidade, a NBR 12655 ABNT (2022a) estabelece os valores mínimos desses parâmetros (Quadro 5) a depender das condições de exposição da estrutura ou de suas partes (Quadro 6).

Quadro 5 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto kg/m ³	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360
CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado.					
CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.					

Fonte: NBR 12655 ABNT (2022a).

Quadro 6 – Classes de agressividade ambiental.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	
^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).			
^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.			
^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes e indústrias químicas.			

Fonte: NBR 12655 ABNT (2022a).

3.4 MÉTODOS DE DOSAGEM NACIONAIS

O Engenheiro Gilberto Molinari, do IPT, fundou junto com Basílio, Petrucci, Falcão Bauer, Kuperman, Prizskulnik, Sbrighi, Isaia e outros grandes nomes da engenharia civil, em 1972, o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), que passou a representar, a partir de então, o mais expressivo canal de divulgação de trabalhos sobre concreto no país (HELENE; TERZIAN, 1992).

O IBRACON é uma organização técnico-científica de caráter associativo, sem fins lucrativos, com o objetivo de proporcionar aos estudantes e profissionais do ramo da construção civil nacional informações e conhecimentos sobre pesquisa, desenvolvimento e inovação relativos à tecnologia do concreto e aos seus sistemas construtivos.

Dentre as publicações do extenso acervo do instituto — artigos, livros técnicos, revistas, práticas recomendadas — está o método de dosagem de concreto o qual, atualmente, leva seu nome. Entretanto, pode-se afirmar, de uma maneira geral, que o método do IBRACON teve sua gênese a partir de outros dois métodos de dosagem desenvolvidos por pesquisadores e engenheiros brasileiros ao longo de décadas.

O início fora na década de 50, quando o Professor Eládio Petrucci do ITERS apresentou um método de dosagem por ele desenvolvido. Posteriormente, este método foi modificado com contribuições de pesquisadores do IPT e da EPUSP, sendo hoje um procedimento de dosagem versátil, simples e capaz de atender às exigências técnicas dos projetistas estruturais de forma econômica, produtiva e sustentável (HELENE; TUTIKIAN, 2022).

Para melhor compreender o método e mostrar a evolução da ciência da dosagem de concretos no Brasil, serão apresentados, na Seção 3.4.1 e na Seção 3.4.2, os dois métodos que deram origem ao método do IBRACON, sendo este apresentado e detalhado em seguida na Seção 3.4.3.

3.4.1 Método do IPT

3.4.1.1 Introdução

O Prof. Ary Frederico Torres, então diretor do Laboratório de Ensaios de Materiais — que mais tarde passaria a ser chamado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) —, publicou o primeiro número do Boletim EPUSP em 1927, intitulado “Dosagem dos Concretos”, que constitui uma obra histórica de confirmação dos modelos propostos por Ferét e Abrams para explicar a correlação entre a resistência à compressão do concreto endurecido e a sua compacidade quando fresco (HELENE; TERZIAN, 1992).

Este método de dosagem proposto por Torres é baseado nos estudos de Abrams, caracterizando o agregado total pelo seu “Módulo de Finura” e considerando que dois agregados de mesmo módulo são equivalentes, ou seja, exigem, para um mesmo traço,

a mesma quantidade de água para atingir uma determinada consistência (PETRUCCI, 1993).

A partir dessas premissas, é possível traçar curvas experimentais — para cada tipo de agregado e determinado diâmetro máximo e consistência — que forneçam a relação agregado total/cimento (m) e o módulo de finura do agregado total (MF_t).

Vale observar que o procedimento experimental para a obtenção dessas curvas é bastante trabalhoso, uma vez que apresentam variações em função da consistência da mistura, tipo e diâmetro máximo dos agregados.

3.4.1.2 Etapas do método

As principais etapas de desenvolvimento do método do IPT são apresentadas por Petrucci (1993) como segue:

a) **Determinação do Módulo de Finura do agregado Total (MF_t):**

Escolhidos os materiais componentes do concreto em estudo, o primeiro passo é determinar o módulo de finura do agregado miúdo (MF_a) e do graúdo (MF_p) separadamente, através do ensaio de peneiramento. O módulo de finura do agregado total (MF_t) é então calculado como sendo a média ponderada dos resultados dos módulos obtidos, como mostra a Equação (13); sendo a porcentagem de areia do traço definida pela Equação (14).

$$MF_t = \frac{1}{100} \cdot MF_a + \frac{100 - a_{oo}}{100} \cdot MF_p \quad (13)$$

$$a_{oo} = \frac{a}{m} \cdot 100 \quad (14)$$

onde:

- MF_t = módulo de finura do agregado total;
- MF_a = módulo de finura do agregado miúdo (areia);
- MF_p = módulo de finura do agregado graúdo (pedra);
- a_{oo} = porcentagem de areia no agregado total;
- a = massa de areia em relação à massa de cimento;
- m = massa de agregado total em relação à massa de cimento.

b) **Obtenção do ponto ótimo:**

Esta etapa é dividida em dois momentos: no primeiro, deve-se fixar um traço inicial m e variar a porcentagem de areia no traço e, em consequência, o módulo de finura do agregado total, determinando a quantidade de água necessária para se obter a consistência desejada.

No segundo momento, definida a porcentagem de areia a_{oo} inicial, diminui-se esse valor, podendo assim também diminuir a relação água/cimento (x), até que a mistura deixe de ser trabalhável. Deste modo, atinge-se o ponto ótimo, que corresponde ao último par de valores (x vs. a_{oo}) para o qual o concreto ainda possua a trabalhabilidade requerida para o traço em estudo.

Em outras palavras, o ponto ótimo representa a composição de agregado que exige a menor quantidade de água para atingir a consistência desejada e, portanto, que permita a execução do concreto de maior resistência.

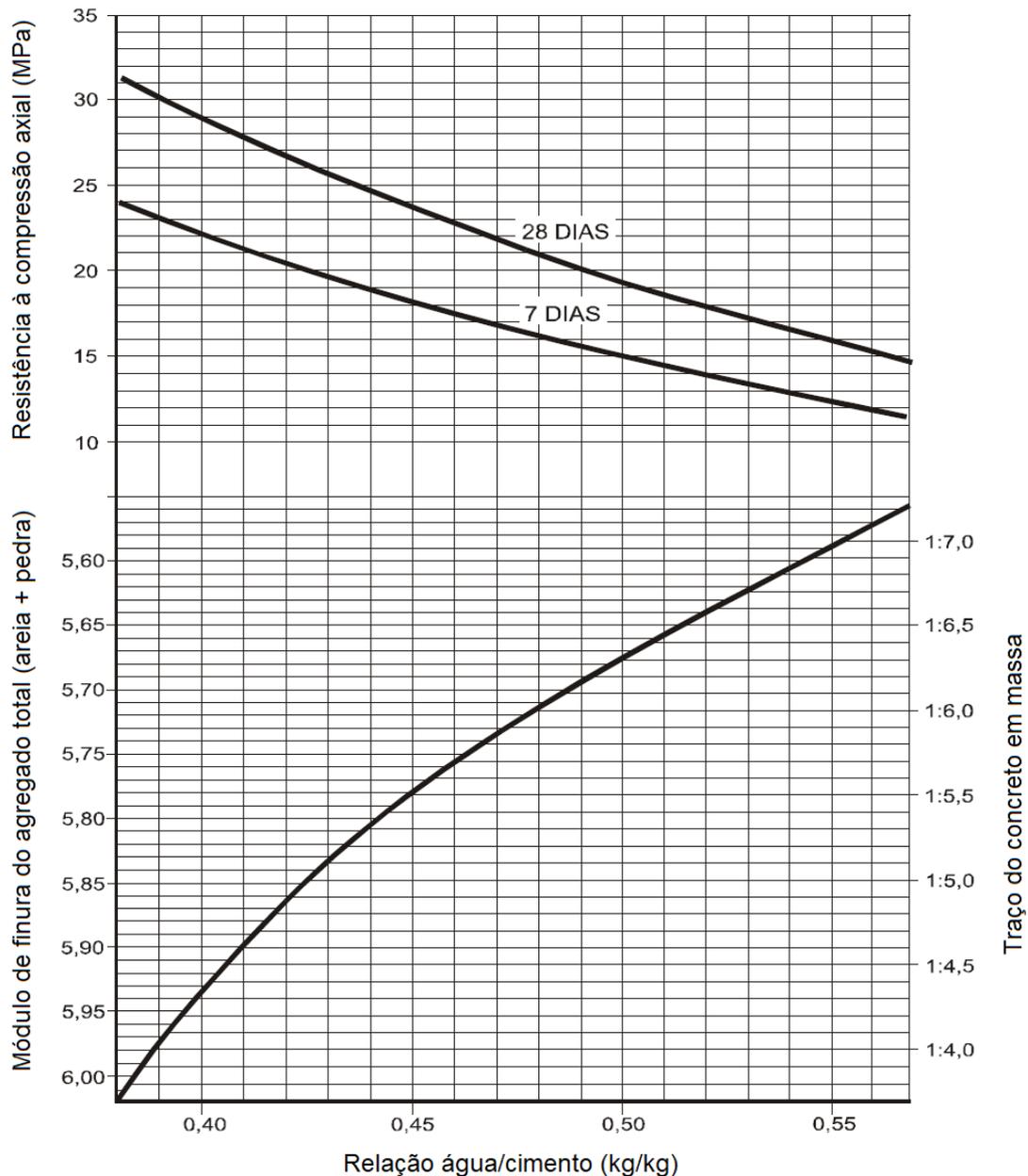
c) Variação do traço e confecção de corpos de prova:

Repete-se o procedimento da etapa anterior agora para outros valores de m (p.ex. $m-1$; $m-2$; ...; $m-i$), determinando diferentes pontos ótimos para misturas mais ricas em cimento e, por consequência, mais resistentes.

Para cada mistura associada ao ponto ótimo obtido, deve-se calcular o módulo de finura do agregado total correspondente e moldar corpos de prova para análise da resistência compressão axial (f_{cj}). Assim, obtém-se as quatro variáveis, para cada ponto, necessárias ao traçado da curva de dosagem: m_i ; x_i ; MF_{ti} e f_{cji} .

Plotando esses pontos em um gráfico, é possível traçar a curva de dosagem para traços com uma determinada consistência. A Figura 3 mostra um exemplo.

Figura 3 – Curva de correlação do traço com o módulo de finura do agregado total e a relação água/cimento.



Fonte: adaptado de (PETRUCCI, 1993).

3.4.2 Método do ITERS

3.4.2.1 Introdução

Conforme explica Boggio (2000), o Prof. Eládio Petrucci, do Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul (ITERS), hodierna Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul (CIENTEC), desenvolveu, em 1951, um método de dosagem em resposta às dificuldades e insucessos da aplicação dos métodos brasileiros difundidos até então (como o do IPT e do INT) quando utilizados os agregados existentes na região

do estado do Rio Grande do Sul.

Assim, o método do ITERS pode ser aplicado em qualquer região do país adaptando-se a materiais diversos. Para tanto, esse método — diferente dos demais existentes na época — não enquadra a granulometria e o módulo de finura dos agregados a curvas ou limites preestabelecidos. Petrucci obteve composições de concreto por via inteiramente experimental e realizou diversos estudos com agregados da região de Porto Alegre/RS procurando manter as mesmas condições de trabalhabilidade (HELENE; TUTIKIAN, 2022; BOGGIO, 2000).

Outra grande característica do método é a ênfase na composição que conduziisse à máxima trabalhabilidade dos concretos, de forma a garantir peças mais compactas sem a necessidade de um adensamento tão enérgico e de maiores cuidados da mão-de-obra.

3.4.2.2 Etapas do método

O procedimento para aplicar o método de dosagem do ITERS, descrito por Petrucci na primeira edição do seu livro “Concreto de Cimento Portland” de 1963, consiste nos seguintes passos:

a) **Determinação da proporção ótima areia/agregado total (a/m) e do teor água/materiais secos (H):**

O ponto de partida é determinar um traço $1 : m^*$ (em massa) que se julgue próximo do traço definitivo almejado. O valor inicial de m pode ser obtido de duas maneiras: a primeira é baseada em experiências prévias com os materiais disponíveis ou no conhecimento de um tecnologista. A segunda maneira é mais analítica, fixando uma relação água/cimento (x) que atenda as exigências de resistência e durabilidade do projeto e tomando uma relação água/materiais secos (H) de acordo com as necessidades de trabalhabilidade da mistura fresca. Para uma primeira aproximação, adotam-se os valores de H propostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores indicativos da relação água/materiais secos H inicial.

Agregado graúdo	Adensamento	
	Manual	Vibrado
Seixo rolado	H = 8%	H = 7%
Pedra britada	H = 9%	H = 8%

Obs.: para $D_{máx} = 19$ mm, deve-se adicionar 0,5% aos valores de H.

Fonte: Petrucci (1993).

Baseadas na Lei de Lyse, estas porcentagens foram obtidas por Petrucci em estudo de concretos compostos pelos dois tipos de agregados mais utilizados na região de Porto

Alegre/RS à época e com diâmetro máximo de 25 mm. Assim, da Equação (4) e definidos H e x , é possível obter o valor de m .

Em seguida, preparam-se três ou quatro misturas do mesmo traço $1 : m^*$ obtido, variando a porcentagem de areia no agregado total (a/m) de 5% em 5%. Petrucci, por exemplo, recomenda o estudo das porcentagens observadas na Tabela 3 em função do tipo de agregado graúdo utilizado.

Tabela 3 – Valores indicativos das relações areia/agregado total (a/m) a serem estudadas.

Agregado graúdo	a/m			
Seixo rolado	25%	30%	35%	40%
Pedra britada	30%	35%	40%	45%

Fonte: Petrucci (1993).

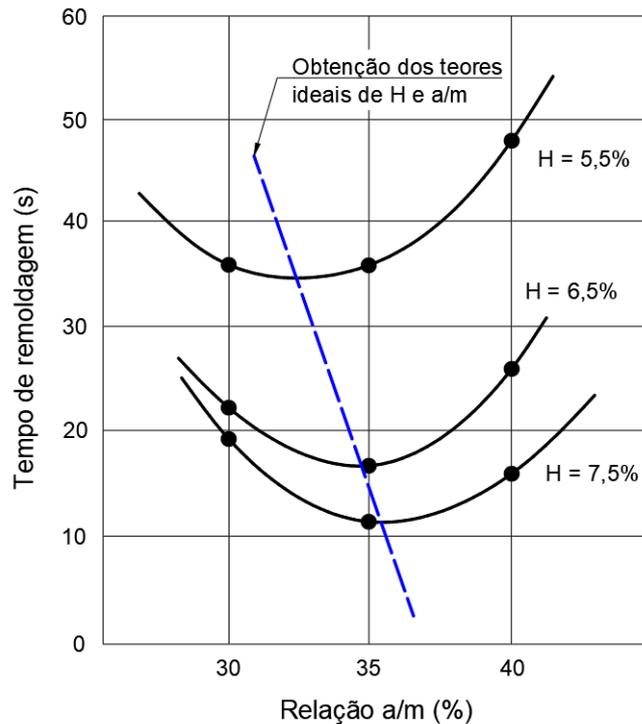
Para cada uma dessas misturas, com seus respectivos valores de a/m , adiciona-se água de tal forma que os valores de H aumentem de 1% em 1%, até atingirem a trabalhabilidade desejada. Novamente, o autor do método sugere iniciar a experiência com $H = 5\%$.

A fim de avaliar a consistência e a resistência à segregação do concreto da maneira o mais objetiva possível, com independência do operador e considerando essencialmente o efeito dinâmico do processo, Petrucci optou pelo uso do ensaio de *remoldagem de Powers*.

Desta forma, se estudadas quatro relações a/m e quatro relações H , devem ser realizados dezesseis ensaios para determinar os respectivos índices de remoldagem. É aqui, explica Boggio (2000), que a experiência do tecnologista adquire fundamental importância, pois ele pode determinar previamente ou durante o desenvolvimento do estudo a quantidade de ensaios a serem realizados e quais relações a/m e H que valem a pena testar. Além disso, nesta etapa surgem relevantes interpretações e observações acerca da adequabilidade das misturas produzidas para os fins requeridos.

Com os resultados da trabalhabilidade dos concretos, medida pelo aparelho de Powers, das diferentes combinações de H e a/m , deve-se construir um gráfico, similar ao mostrado na Figura 4, o qual apresente as diferentes relações a/m no eixo das abscissas, e os índices da remoldagem de Powers no eixo das ordenadas — expressos em números de golpes na mesa manual ou em segundos na mesa vibratória — correspondentes às diferentes relações de H .

Figura 4 – Curvas de trabalhabilidade obtidas a partir dos índices de remoldagem de Powers para concretos com igual m e diferentes relações a/m .



Fonte: adaptado de (ASSUNÇÃO, 2002).

Uma vez determinados todos os pontos dos ensaios, procede-se ao traçado das curvas que unem os pontos de igual relação água/materias seco H dos diferentes teores de areia em relação ao agregado total a/m . Os trechos destas curvas que ficam abaixo da reta horizontal determinada por um índice de remoldagem escolhido, possibilitam obter misturas de concreto cujas características no estado fresco atendem às exigências de trabalhabilidade requeridas na obra. Contudo, para melhor otimização do traço, deve-se construir uma reta (em azul e tracejada na Figura 4) que liga os pontos de menores índices de remoldagem das curvas. Esta reta permite, fixado um índice de remoldagem, a obtenção do teor ideal dos parâmetros a/m^* e H^* a serem utilizados na mistura (BOGGIO, 2000; ASSUNÇÃO, 2002).

b) Desdobramento do traço de referência ($1 : m$):

Determinados os valores ideais de a/m^* e H^* experimentalmente, parte-se para o desdobramento do traço de referência $1 : m^*$ em $1 : a : p : x$, utilizando a Equação (4) para encontrar a relação água/cimento (x) e lembrando que m é a quantidade total de agregado em relação a quantidade de cimento ($m = p + a$).

Além disso, cabe destacar que, uma vez fixado o valor inicial de m , existe uma correspondência biunívoca entre o teor de argamassa α e a relação a/m dada pela Equação (15). Desta forma, pode-se determinar também o teor de argamassa seca ideal (α^*) do traço de referência.

$$\alpha = \frac{1/m + a/m}{1/m + 1} \quad (15)$$

onde:

- α = teor de argamassa seca;
- m = relação agregado total/cimento;
- a/m = relação agregado miúdo/cimento.

c) Composição dos traços auxiliares:

Fundamentado na Lei de Lyse, Petrucci (1993) afirma que traços com valores de m próximos ao adotado no traço referência, mantidos os mesmos materiais e a mesma trabalhabilidade, apresentarão praticamente os mesmos valores da relação água/materiais secos H . Assim, é indicada a composição de dois a três traços auxiliares ($1 : m_1$; $1 : m_2$ e $1 : m_3$), em torno do referência, para posterior análise da resistência mecânica do conjunto.

Observa-se que quando m varia, deixa de existir a correspondência biunívoca entre a/m e α para os diferentes traços. Portanto, há dois caminhos igualmente válidos que conduzem a concretos bem proporcionados e de trabalhabilidade semelhante. O primeiro deles é variar o traço m mantendo constantes o teor de argamassa ótimo α^* e a relação água/materiais secos H^* , e o segundo caminho seria variar m mantendo constantes a relação areia/agregado total a/m^* e H^* .

Recomenda-se a variação de m de forma a obter traços mais ricos e mais pobres em relação ao referência. O desdobramento destes traços auxiliares é análogo ao desdobramento do traço referência da etapa anterior, mantendo constantes os valores de H^* , α^* e a/m^* de acordo com o procedimento adotado.

d) Avaliação da resistência mecânica:

Independentemente do caminho escolhido, serão obtidos traços auxiliares com diferentes relações água/cimento (x) e, conseqüentemente, concretos com diferentes resistências à compressão. Portanto, para cada traço (inclusive o referência), moldam-se corpos-de-prova a serem ensaiados nas idades de interesse, normalmente 7 e 28 dias. Os resultados dos ensaios permitirão o traçado das *curvas de Abrams*, adotando a Equação (2) cujas constantes podem ser determinadas pelo método dos mínimos quadrados¹. Essas curvas vinculam as resistências à compressão com as respectivas relações água/cimento para traços de concretos de uma mesma família, i.e. concretos que apresentam a mesma trabalhabilidade prefixada pela constância da relação H^* .

Através das curvas, é possível tomar o valor almejado de resistência à compressão e determinar o x^* associado. Com as relações x^* e H^* definitivas, calcula-se um novo valor

¹O Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) é uma técnica de otimização matemática que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados

de m utilizando a Equação (4) e a partir dos valores constantes de α^* ou a/m^* adotados, é encontrado a e p , completando o desdobramento do traço final. Vale ressaltar que este traço obtido ainda deve ser testado em laboratório para a comprovação das características mecânicas e de trabalhabilidade buscadas.

3.4.3 Método do IBRACON (IPT/EPUSP)

O autor do presente trabalho lembra que esta é a metodologia de dosagem adotada para a confecção dos concretos desta pesquisa. Em vista disso, o método IBRACON será descrito com maiores ênfase e detalhe em relação aos anteriores.

3.4.3.1 Introdução

Em 1992, o professor da EPUSP Paulo Helene e o engenheiro do IPT Paulo Terzian publicaram o “Manual de Dosagem e Controle do Concreto”, no qual os autores apresentaram um método de dosagem de concreto com a justificativa de ensinar uma metodologia clara e precisa, e com a grande vantagem de obter de modo rápido e racional o traço mais econômico possível que atenda às características de resistência e durabilidade estabelecidas (HELENE; TERZIAN, 1992).

A metodologia tem como base os métodos propostos por Eládio Petrucci (1951) do ITERS e por Ary Torres do IPT, juntamente com modificações e contribuições de pesquisadores do IPT (Prizkulnik, Kirilos, Terzian e Tango) e da EPUSP (Helene). Assim, tal método ficara conhecido à época e até poucos anos atrás como método do IPT/EPUSP, mas hoje, na sua versão atual, denomina-se método IBRACON.

Helene e Tutikian (2022) explicam que o método possui uma parte experimental em laboratório e outra analítica, baseada nas leis clássicas da tecnologia do concreto, sendo então classificado como um método teórico-experimental. A primeira parte é de fundamental importância, pois é através dela que se descobre o teor ideal de argamassa seca (α) e a mínima quantidade de água para obter a trabalhabilidade desejada. Dessa forma, a proporção entre agregados miúdos e graúdos é otimizada incluindo implicitamente a interferência do cimento, agregados, adições e de outros materiais utilizados.

Tal abordagem difere de outros métodos — ACI 211.1-91, Carbonari, O’Reilly e De Larrard, por exemplo — os quais apenas tratam de otimizar, por separado, por um lado, a mistura de agregado miúdo/grauído baseada em curvas granulométricas ideais, e por outro a pasta de cimento, adições e aditivos, com a intenção de produzir um concreto ótimo ao serem finalmente juntadas na betoneira.

3.4.3.2 Limites de aplicação

Os limites de aplicação do método IBRACON são:

- Resistência à compressão: $5 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 150 \text{ MPa}$;
- Relação água/cimento: $0,15 \leq a/c \leq 1,50$;
- Abatimento: $0 \text{ mm} \leq slump \leq \text{autoadensável}$;
- Dimensão máxima do agregado: $4,8 \text{ mm} \leq D_{max} \leq 100 \text{ mm}$;
- Teor de argamassa seca: $30\% \leq \alpha \leq 90\%$;
- Fator água;materiais secos: $5\% \leq H \leq 12\%$;
- Módulo de finura do agregado: qualquer;
- Distribuição granulométrica: qualquer;
- Massa específica do concreto: $> 1500 \text{ kg/m}^3$.

3.4.3.3 Etapas do método

Antes de dar início ao processo de dosagem, é necessário definir três informações que irão auxiliar na definição do traço do concreto: resistência característica à compressão (f_{ck}), dimensão máxima característica do agregado graúdo (D_{max}) e abatimento do tronco de cone ($slump$).

De posse desses valores, seguem-se as etapas do método de dosagem IBRACON descritas por Helene e Tutikian (2022):

a) **Determinação da proporção ideal entre os agregados graúdos:**

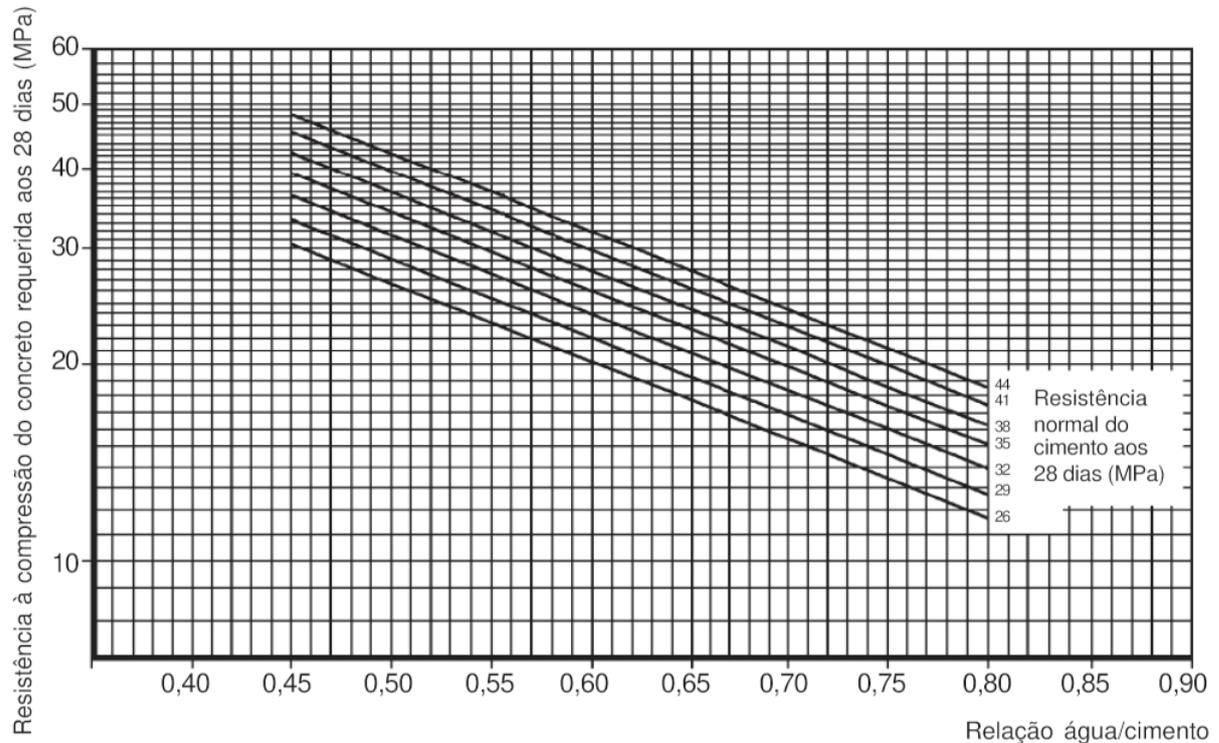
Caso seja possível e viável a utilização de dois tipos de agregados graúdos com granulometrias diferentes, respeitando sempre o D_{max} normalmente estipulado pelo projetista estrutural, deve-se compor uma mistura dos dois agregados, cujas proporções são obtidas através do ensaio da máxima massa unitária compactada descrito pela (ABNT, 2021b).

Quando o agregado graúdo for considerado de forma lamelar, é indicado confirmar a efetividade da composição “ideal” em estudo prático de dosagem, pois a mistura de agregados pode induzir à necessidade de um alto teor de argamassa no concreto, tornando-o antieconômico (HELENE; TERZIAN, 1992).

b) **Estimativa inicial da relação água/cimento (x):**

A melhor maneira de obter a relação água/cimento (x) do traço inicial, como indicado nos métodos de dosagem da ACI e da ABCP, é por meio da Curva de Abramns confeccionada com os materiais a serem utilizados no estudo do concreto. Por ser este um processo demorado e trabalhoso, tem-se como alternativa utilizar as curvas de Walz (Figura 5) obtidas por Bucher (1989) e desenvolvidas no Departamento de Concreto da ABCP. Tais curvas foram determinadas por meio de traços experimentais produzidos com cimentos de diferentes marcas, tipos e classes e com agregado graúdo britado granítico e agregado miúdo proveniente de areia de rio.

Figura 5 – Curvas de Walz para determinação da relação água/cimento (x) em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias.



Fonte: adaptado de (BUCHER, 1989).

Outra forma simplificada de obter o valor de x é a partir da Equação (4) e do traço m conhecido, adotando $H = 10\%$ como aproximação inicial (PRUDÊNCIO JR, 2017).

c) Determinação dos traços piloto, rico e pobre:

A fase experimental parte do princípio que são necessário três pontos, no mínimo, para montar o diagrama de dosagem, conforme ilustrado anteriormente na Figura 2, o qual correlaciona a resistência à compressão (f_{cj}), a relação água/cimento (x), o traço (m) e o consumo de cimento (C) de uma família de concretos de mesmo abatimento.

Esses três pontos estão associados a três traços diferentes que serão produzidos ao longo do procedimento. Primeiramente é fixado um traço piloto intermediário ($1 : m$) e a seguir é confeccionado dois traços complementares: um mais rico em cimento ($1 : m - 1$ ou $m - 0,5$) e outro mais pobre ($1 : m + 1$ ou $m + 0,5$).

Helene e Terzian (1992) sugerem iniciar o estudo com os traços $1 : 3,5$; $1 : 5,0$ e $1 : 6,5$. Uma alternativa é apresentada por Torres e Rosman (1956 apud BOGGIO, 2000) através da Tabela 4, que permite estimar m , para uma consistência intermediária, em função da relação água/cimento e da dimensão máxima característica do agregado.

Tabela 4 – Estimativa inicial de m em função de D_{max} e de x .

Água/cimento (x)	Dimensão máxima característica do agregado (D_{max})				
	9,5 mm	19 mm	25 mm	38 mm	50 mm
0,35	2	3	3	3	4
0,40	3	3	3	4	4
0,45	3	4	4	4	5
0,50	4	4	5	5	5
0,55	4	5	5	6	6
0,60	4	5	6	6	7
0,65	5	6	6	7	7
0,70	5	6	7	7	8
0,75	6	7	7	8	9
0,80	6	7	8	9	9

Fonte: adaptado de Torres e Rosman (1956 apud BOGGIO, 2000).

d) Determinação do teor ideal de argamassa (α):

Essa é a etapa mais importante do método IBRACON e a que exige maiores atenção e experiência do engenheiro. O objetivo é determinar experimentalmente a quantidade mínima de materiais finos (cimento e areia) suficiente para atingir a trabalhabilidade requerida do concreto. A deficiência de argamassa pode resultar em vazios na estrutura do concreto e falhas de concretagem. Por outro lado, o excesso proporciona um concreto de melhor aparência, mas aumenta o custo por metro cúbico, assim como o risco de fissuração de origem térmica e de retração por secagem (HELENE; TERZIAN, 1992).

Para encontrar o α do concreto, toma-se o traço piloto ($1 : m$) e, a partir de sucessivas variações no teor de argamassa da mistura, determina-se a proporção adequada por tentativas e observações práticas. Helene e Terzian (1992) recomendam incrementos no teor de argamassa de 2% em 2%, criando uma série de traços (i) de mesmo m mas com teores de argamassa (α_i) diferentes.

Os desdobramentos do traço m em função do α_i adotado é realizado a partir das equações Equação (16) e Equação (17).

$$a_i = \alpha_i \left(\frac{1 + m}{100} \right) - 1 \quad (16)$$

$$p_i = m - a_i \quad (17)$$

onde:

- a_i = relação agregado miúdo/cimento da iteração i ;
 α_i = teor de argamassa seca da iteração i ;
 m = relação agregado total/cimento;
 p_i = relação agregado graúdo/cimento da iteração i .

Já a Equação (18), Equação (19), Equação (20) e Equação (21) são usadas para o cálculo das quantidades de cada material a serem colocadas na betoneira, a partir do consumo de cimento por metro cúbico de concreto calculada pela equação Equação (11). No caso da utilização de dois ou mais tipos de agregados graúdo e miúdo, basta multiplicar a_i e p_i pelas respectivas porcentagens da composição granulométrica dos agregados.

$$Q_{c1} = \frac{C1V_b}{1000} \quad (18)$$

$$Q_{a1} = \frac{Ca_1V_b}{1000} \quad (19)$$

$$Q_{p1} = \frac{Cp_1V_b}{1000} \quad (20)$$

$$Q_{w1} = \frac{CxV_b}{1000} \quad (21)$$

onde:

- Q_{c1}, Q_{a1}, Q_{p1} e Q_{w1} = quantidade de cimento, de areia, de brita e de água, respectivamente, da mistura do primeiro traço;
 a_1, p_1 = relação agregado miúdo/cimento e agregado graúdo/cimento, respectivamente, do primeiro traço;
 x = relação água/cimento;
 C = consumo de cimento, em kg/m³;
 V_b = volume de concreto fresco da mistura, em l.

Este cálculo servirá apenas para o traço de partida (a_1 e p_1). Como a ideia é aumentar gradativamente α sem alterar o traço m , isso implicará no aumento de a e na diminuição de p , gerando a necessidade de retirar, ao longo do processo experimental, agregado graúdo da mistura de dentro da betoneira, o que certamente se torna inviável. Portanto, as quantidades de materiais dos traços seguintes serão obtidas em função da quantidade de material calculada para o agregado graúdo do traço de partida (p_1), mantendo m e C^2 constantes.

²Conforme Helene e Tutikian (2022), o acerto do teor de argamassa seca α nada mais é do que a substituição gradativa do agregado graúdo pelo agregado miúdo, sem interferir no consumo de cimento (C). Entretanto, convém observar que existirá uma pequena alteração no valor de C quando houver, e geralmente há, diferença entre as massas específicas dos agregados.

$$Q_{ci} = \frac{1Q_{p1}}{p_i} \quad (22)$$

$$Q_{ai} = \frac{a_i Q_{p1}}{p_i} \quad (23)$$

$$Q_{wi} = \frac{x Q_{p1}}{p_i} \quad (24)$$

onde:

Q_{ci} , Q_{ai} e Q_{wi}	= quantidade de cimento, de areia e de água, respectivamente, da mistura dos traços $i > 1$;
Q_{p1}	= quantidade de brita da mistura do primeiro traço;
a_1	= relação agregado miúdo/cimento dos traços $i > 1$;
x	= relação água/cimento;
C	= consumo de cimento, em kg/m^3 ;
V_b	= volume de concreto fresco da mistura, em l.

Nota-se que a quantidade de brita permanecerá sempre constante, e serão inseridas apenas novas quantidades de cimento, areia e água. Esta última é calculada, conforme a Equação (24), de forma a manter a relação água/cimento inicial, mas serve apenas como referência, pois a quantidade de água adicionada, bem como a de aditivos, vai depender da trabalhabilidade momentânea do concreto no decorrer da mistura.

Helene e Terzian (1992), Helene e Tutikian (2022) apresentam a seguinte sequência de atividades a serem desenvolvidas no laboratório para bem conduzir a parte experimental do método aqui exposto:

1. Imprimir a betoneira com uma porção de argamassa ($> 20 \text{ kg}$) com o traço $1 : 2$, $x = 0,6$. Deixar o material excedente cair livremente, quando a betoneira estiver com a abertura (boca) para baixo e em movimento;
2. A introdução dos materiais na betoneira deve obedecer, preferencialmente, à seguinte ordem: água (80%); agregado graúdo; cimento; agregado miúdo e aditivo, se houver. Misturar por cinco minutos, com uma parada intermediária para limpeza das pás da betoneira;
3. Adicionar o restante da água aos poucos, observando e controlando até obter o abatimento requerido;
4. Após este procedimento, são realizados os acréscimos³ sucessivos de argamassa

³Os acréscimos de materiais (referentes a cada teor de argamassa), devem estar preparados, pesados e claramente identificados com antecedência de forma a evitar trocas involuntárias e acelerar o processo de dosagem, minimizando a perda de água de amassamento por evaporação (BOGGIO, 2000).

na mistura, através do lançamento de cimento, areia e água — esta última de acordo com a necessidade de ajuste na trabalhabilidade. A quantidade de agregado graúdo não é alterada;

5. Para definir o α ideal, deve-se realizar o procedimento baseado em observações práticas descrito a seguir, para cada teor de argamassa (α_i):
 - a) Com a betoneira desligada, nivelar a superfície do concreto com a colher de pedreiro e observar se a mesma é compacta, sem vazios e não se apresenta áspera, indicando α adequado;
 - b) Introduzir a colher de pedreiro no concreto e levantar no sentido vertical para verificar se a superfície exposta possui vazios, indicando a falta de argamassa;
 - c) Introduzir novamente a colher de pedreiro no concreto e retirar uma parte do mesmo, levantando-o até a parte superior da cuba da betoneira. Com o material nesta posição, verificar se há desprendimento de brita da massa, o que indica falta de argamassa. Após esta observação, soltar a porção de concreto que está sobre a colher e verificar se ela cai de modo coeso e homogêneo, indicando teor de argamassa adequado;
 - d) Para as misturas que apresentarem adequabilidade aos testes anteriores, ou seja, com superfície lisa e sem vazios, sem desprendimento de agregados e queda do concreto de modo compacto e homogêneo, determina-se o abatimento do tronco de cone (*slump test*). Caso não se atinja o *slump* estabelecido, deve-se acrescentar água;
 - e) Estando ainda o concreto no formato de tronco de cone, observar se a superfície lateral está compacta, com aspecto liso e sem apresentar vazios;
 - f) Outra observação a ser realizada é se ao redor da base do concreto no formato de cone aparece uma camada de água oriunda da mistura. Essa ocorrência evidencia que há tendência a exsudação de água nesta mistura por falta de finos, que pode ser corrigida com uma mudança na granulometria da areia, colocar ou aumentar o teor de adições minerais ou de cimento;
6. Uma vez encontrado o teor ideal de argamassa seca do traço piloto, o qual atende os requisitos ponderados anteriormente, é recomendado ainda um acréscimo de 2% a 4% no valor de α a fim de compensar as possíveis perdas de argamassa no processo de transporte e lançamento do concreto;
7. Realizar uma *nova mistura*⁴ do traço piloto intermediário — com o teor de argamassa definitivo acrescido da margem de perdas — e determinar todas as

⁴No procedimento iterativo, calcular a quantidade de água requerida para atingir a consistência desejada é bastante difícil. Assim, o fato de existir perdas de água e de argamassa nas segundas

características do concreto fresco:

- Relação água/cimento;
 - Consumo de cimento por metro cúbico de concreto;
 - Consumo de água por metro cúbico de concreto;
 - Massa específica do concreto fresco;
 - Abatimento do tronco de cone (*Slump test*);
 - Teor de ar aprisionado;
 - Teor de argamassa seca (α^*);
 - Relação água/materiais secos (H^*).
8. Moldar, no mínimo, dois corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à compressão axial para cada idade de ruptura desejada.

e) Reprodução dos traços auxiliares:

Esta etapa consiste em reproduzir os outros dois traços auxiliares (rico e pobre em cimento) já determinados na Etapa (c). Atenta-se ao fato de que os novos traços devem ser produzidos com o mesmo teor ideal de argamassa seca (α^*) e a mesma relação água/materiais secos (H^*) obtidos para o traço piloto.

As proporções dos materiais devem ser calculadas analiticamente de maneira análoga à do traço piloto, apenas substituindo o valor de m para cada novo traço, conforme a Equação (25) e a Equação (26).

$$m_p = \begin{cases} m + 1, & \text{ou} \\ m + 0,5 \end{cases} \quad (25)$$

$$m_r = \begin{cases} m - 1, & \text{ou} \\ m - 0,5 \end{cases} \quad (26)$$

onde:

m = relação agregado total/cimento do traço piloto intermediário;

m_p = relação agregado total/cimento do traço pobre;

m_r = relação agregado total/cimento do traço rico.

f) Traçado dos diagramas de dosagem:

De posse dos resultados das resistências, deve ser construído o diagrama de dosagem. Além das leis clássicas da tecnologia do concreto, o método IBRACON possibilita

determinações do *slump test*, somado às perdas de água por evaporação devido ao lento processo experimental, impõem a necessidade de realizar uma nova mistura com o mesmo traço intermediário m (BOGGIO, 2000).

a avaliação do rendimento do concreto em função da relação entre o consumo de cimento e a resistência à compressão. Para tal análise, é utilizado o 4º Quadrante do diagrama.

Através da plotagem dos pontos obtidos experimentalmente (f_{cj} , a/c , m e C), determinam-se os coeficientes das equações de Abramns, Lyse, Prizskulnik & Kirilos e do 4º Quadrante do diagrama pelo processo dos mínimos quadrados, o qual consiste na regressão linear dessas equações.

A Tabela 5 mostra a linearização das equações, bem como a posição de cada uma delas no ábaco de dosagem. Vale lembrar que a Lei de Lyse já é uma equação do primeiro grau.

Tabela 5 – Regressão linear das Leis clássicas da tecnologia do concreto.

Quadrante	Equação original	Regressão linear
1º Quadrante (Lei de Abrams)	$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{(a/c)}}$	$\log f_{cj} = \log k_1 - \log k_2 \cdot \frac{a}{c}$
2º Quadrante (Lei de Lyse)	$m = k_3 + k_4 \cdot \frac{a}{c}$	$m = k_3 + k_4 \cdot \frac{a}{c}$
3º Quadrante (Lei de Preszkulnik & Kirilos)	$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \cdot m}$	$\frac{1}{C} = \frac{k_3}{1000} + \frac{k_4}{1000} \cdot m$
4º Quadrante	$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{(k_7+k_8(1/C))}}$	$\log f_{cj} = \log k_1 - \log k_2 \left(k_7 + k_8 \cdot \frac{1}{C} \right)$

Fonte: elaborado pelo autor.

4 MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo tem como objetivo apresentar os materiais utilizados, a metodologia experimental desenvolvida e os parâmetros analisados para que fossem atingidos os objetivos do corrente trabalho.

A fim de melhor organizar a exposição das atividades experimentais, o capítulo será dividido em duas etapas principais, de acordo com a ordem cronológica de realização. A primeira parte descreve os materiais empregados na pesquisa e suas respectivas caracterizações. A segunda mostra o procedimento de fabricação dos concretos e os parâmetros de dosagem estudados.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

4.1.1 Agregados miúdos

Os agregados miúdos são originários de jazidas da região de Florianópolis-SC, sendo empregado uma areia natural fina, de origem quartzosa, provinda de dunas e uma areia média oriunda da britagem de rocha basáltica.

As massas específicas desses agregados foram determinadas pelo método do picnômetro (Figura 6) descrito pela norma D854 ASTM (2014), obtendo-se os valores de $2,64 \text{ kg/dm}^3$ para a areia natural e de $2,94 \text{ kg/dm}^3$ para areia artificial.

Figura 6 – Determinação da massa específica dos agregados miúdos pelo método do picnômetro.



Fonte: elaborado pelo autor.

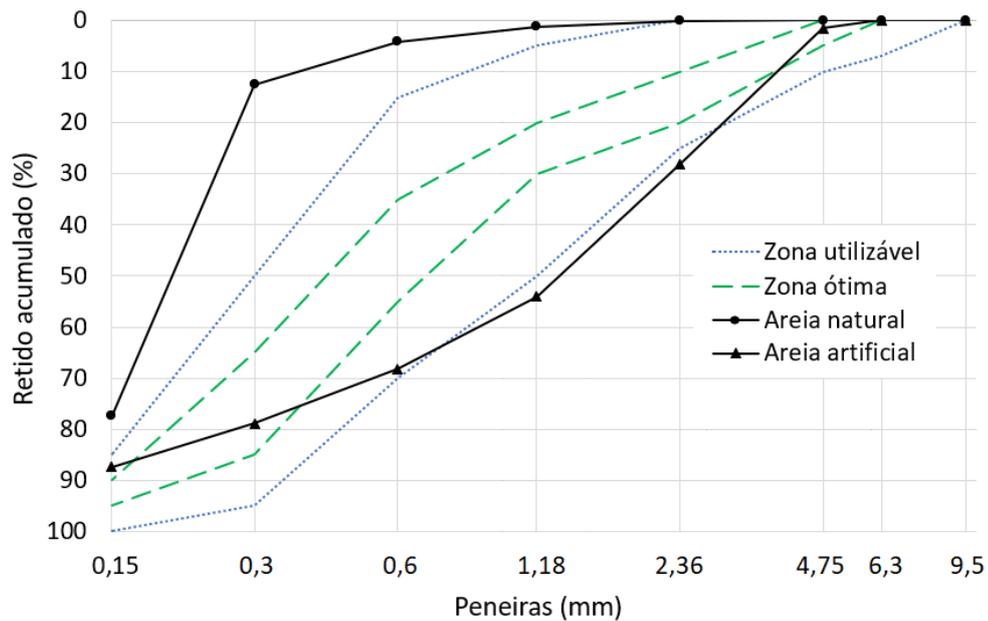
O Quadro 7 apresenta as distribuições granulométricas, as dimensões máximas características e os módulos de finuras obtidos, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2022b), para cada uma das areias. Na Figura 7, é possível visualizar, graficamente, as curvas granulométricas desse agregados, bem como suas zonas de utilização definidas pela mesma norma.

Quadro 7 – Composição granulométrica dos agregados miúdos.

Abertura da peneira (mm)	Areia natural			Areia de britagem (artificial)		
	Média* (g)	Retida (%)	Retida acumulada (%)	Média* (g)	Retida (%)	Retida acumulada (%)
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	0	0	0	0	0	0
4,75	0	0	0	7,8	1,6	1,6
2,36	0,6	0,1	0,1	132,8	26,6	28,2
1,18	5,8	1,2	1,3	129,1	25,9	54,0
0,6	14,2	2,8	4,1	70,9	14,2	68,2
0,3	42,0	8,4	12,5	53,4	10,7	78,9
0,15	323,4	64,8	77,4	42,0	8,4	87,3
Fundo	113,0	22,6	100,0	63,2	12,7	100,0
Soma	498,8	100,0		499,1	100,0	
$D_{max} = 0,6 \text{ mm}$			$D_{max} = 4,75 \text{ mm}$			
$MF = 0,95$			$MF = 3,18$			
*Valores obtidos da média de dois ensaios de peneiramento.						

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 7 – Curvas e limites granulométricos dos agregados miúdos



Fonte: elaborado pelo autor.

Nota-se que tanto a granulometria da areia natural como a da areia artificial estão fora da faixa utilizável indicada pela norma. Esse quadro já era esperado e, portanto, efetuou-se uma mistura das duas areias cuja composição respeita os limites da zona utilizável. Maiores detalhes desta proporção serão apresentados na Seção 4.2.1.

4.1.2 Agregados graúdos

Os agregados graúdos também são originários de jazidas da região de Florianópolis-SC. Foram escolhidos dois tamanhos de agregados, brita 1 e brita 0, ambas provenientes da britagem de rocha basáltica.

As massas específicas desses agregados foram determinadas pelo método da balança hidrostática (Figura 6) normatizado pela NBR 16917 ABNT (2021a), obtendo-se os valores de $2,92 \text{ kg/dm}^3$ para a brita 0 e de $2,94 \text{ kg/dm}^3$ para brita 1.

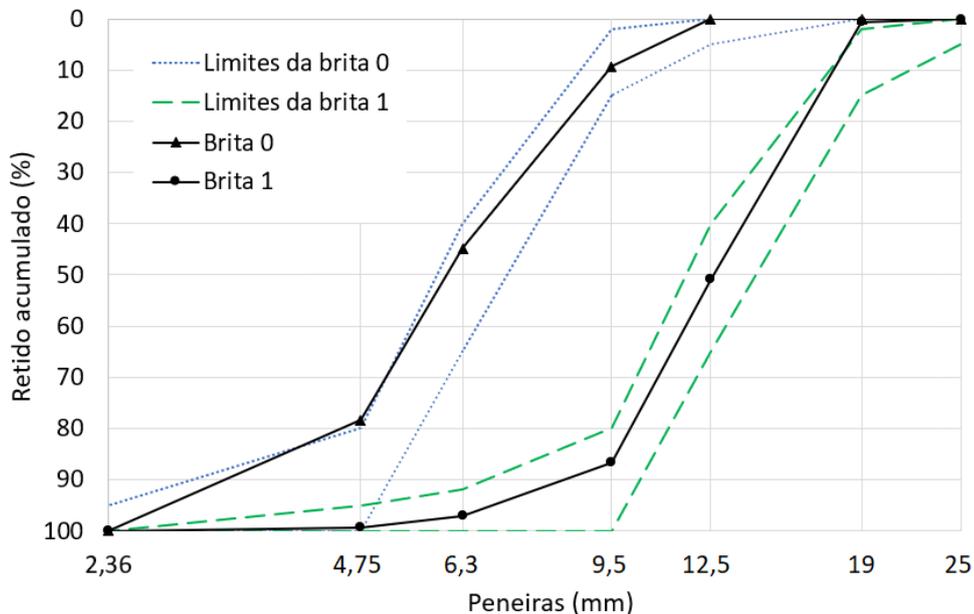
O Quadro 8 mostra as distribuições granulométricas, as dimensões máximas características e os módulos de finuras obtidos, também conforme NBR 7211 (ABNT, 2022b), para cada uma das britas. Tal norma igualmente define os limites granulométricos desses agregados, apresentados na Figura 8, junto com suas curvas.

Quadro 8 – Granulometria dos agregados graúdos.

Abertura da peneira (mm)	Brita 0			Brita 1		
	Média* (g)	Retida (%)	Retida acumulada (%)	Média* (g)	Retida (%)	Retida acumulada (%)
31,5	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	28	0,6	0,6
12,5	3	0,1	0,1	2515	50,3	50,9
9,5	460	9,2	9,3	1786	35,7	86,6
6,3	1776	35,6	44,8	520	10,4	97,0
4,75	1674	35,5	78,3	119	2,4	99,4
Fundo	1082	21,7	100,0	31	0,6	100,0
Soma	4995	100,0		4999	100,0	
$D_{max} = 12,5$ mm			$D_{max} = 19$ mm			
$MF = 6,32$			$MF = 8,34$			
* Valores obtidos da média de dois ensaios de peneiramento.						

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8 – Curvas e limites granulométricos dos agregados graúdos



Fonte: elaborado pelo autor.

Embora a composição granulométrica das duas britas respeitem os limites fixados pela norma, preferiu-se, como indicam Helene e Terzian (1992), realizar uma composição entre esses agregados, da qual obteve-se a maior massa específica unitária compactada. O processo de obtenção da composição será aprofundado na Seção 4.2.1.

4.1.3 Cimentos

Para a realização do corrente estudo e confecção dos concretos, utilizaram-se quatro tipos de cimentos Portland da mesma marca, sendo estes: CP II-F-40, CP V-ARI, CP II-F-32 e CP IV-32 RS.

As características físicas e composições químicas de cada cimento foram obtidas dos resultados dos ensaios disponíveis no site do fabricante e estão mostradas na Tabela 6 e na Tabela 7, respectivamente.

Tabela 6 – Composições químicas dos cimentos Portland.

Cimento	Teores em massa de óxidos presentes (%)					
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
CP II-F-40	4,61	17,77	3,00	60,68	3,71	2,97
CP V-ARI	4,45	18,42	3,07	61,22	3,27	2,88
CP II-F-32	4,28	18,18	2,89	59,44	2,44	2,50
CP IV-32 RS	9,49	28,65	3,80	45,05	2,54	2,16

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Propriedades físicas e mecânicas dos cimentos Portland.

Cimento	Massa específica (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Resistência à compressão (MPa)	
			7 dias	28 dias
CP II-F-40	3,04	4,37	43,5	49,7
CP V-ARI	3,06	4,24	44,7	53,5
CP II-F-32	3,05	3,39	36,6	41,9
CP IV-32 RS	2,88	4,22	34,9	45,9

Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.4 Aditivo

Para reduzir a água do concreto e aumentar sua trabalhabilidade, aplicou-se um aditivo líquido superplastificante de pega normal, de terceira geração e baseado na tecnologia de polímeros policarboxilatos.

Algumas características do aditivo químico foram obtidas do catálogo do fabricante e estão resumidas na Tabela 8.

Tabela 8 – Características do aditivo químico.

Características	Descrição
Aspecto/cor	Líquido castanho
Densidade	$1,07 \pm 0,02$ g/cm
valor do pH	$3,7 \pm 1$
Teor de íons cloreto	Isento
Dosagem recomendada	0,20 a 2,00 % sobre o peso do aglomerante

Fonte: elaborado pelo autor.

4.2 PROCEDIMENTOS GERAIS E EQUIPAMENTOS

4.2.1 Composição granulométrica dos agregados

A composição granulométrica do agregado graúdo deu-se por meio da mistura de brita 0 e brita 1 cuja proporção apresentasse a maior massa unitária compactada. Este ensaio foi realizado individualmente, de acordo com a NBR 16972 (ABNT, 2021b), em cada mistura contendo diferentes teores de cada fração de brita.

O procedimento iniciou com 100% de brita 1 e acrescentou-se brita 0 à mistura de maneira a aumentar o seu teor em 10% a cada adição. O Quadro 9 mostra os resultados obtidos em cada proporção ensaiada, sendo a combinação com 60% de brita 1 e 40% de brita 0 a que apresentou maior massa (17,36 kg) contida no recipiente de ensaio e, consequentemente, maior massa unitária compactada.

O ensaio parou na sexta adição de brita 0 devido a tendência de decréscimo no valor das massas observado a partir do valor máximo obtido.

Quadro 9 – Determinação da composição granulométrica do agregado graúdo.

Brita 1 (%)	Brita 0 (%)	Brita 1 (kg)	Brita 0 (kg)	Acréscimo de brita 0 (kg)	Composição no recipiente (kg)	MUC* (kg/dm³)
100	0	16,84	0	0	16,84	1,68
90	10	16,84	1,87	1,87	17,06	1,70
80	20	16,84	4,21	2,34	17,28	1,73
70	30	16,84	7,22	3,01	17,14	1,71
60	40	16,84	11,23	4,01	17,36	1,73
50	50	16,84	16,84	5,61	17,08	1,71
40	60	16,84	25,26	8,42	17,12	1,71
30	70	16,84	39,29	14,03	16,90	1,69
20	80	16,84	67,36	28,07	-	-
10	90	16,84	151,56	84,20	-	-
0	100	16,84	0	0	16,04	1,60

Volume do recipiente: 10,01 dm³.
*MUC: massa unitária compactada.

Fonte: elaborado pelo autor.

Já a composição da granulometria do agregado miúdo deu-se graficamente com auxílio de planilha eletrônica, ajustando os valores da combinação entre os agregados até encontrar uma proporção cuja curva granulométrica melhor se encaixasse dentro das zonas ótima e utilizável.

O Quadro 10 mostra a distribuição granulométrica dessa proporção obtida da ponderação das distribuições médias das areias natural e artificial exibidas no Quadro 7 e, na Figura 9, é expresso o resultado de forma gráfica.

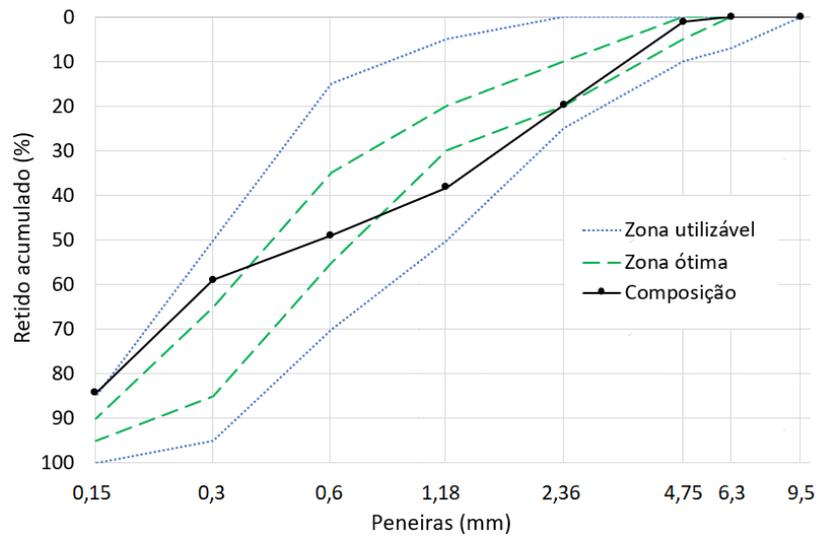
Quadro 10 – Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo.

Abertura da peneira (mm)	Composição		
	Média*	Retida (%)	Retida acumulada (%)
9,5	0	0	0
6,3	0	0	0
4,75	5,46	1,1	1,1
2,36	93,13	18,7	19,8
1,18	92,06	18,4	38,2
0,6	53,86	10,8	49,0
0,3	49,98	10,0	59,0
0,15	126,41	25,3	84,3
Fundo	78,09	15,7	100,0
Soma	498,98	100,0	

*Valores obtidos da ponderação das médias das distribuições granulométricas dos agregados miúdos, sendo compostos de 30% de areia natural e 70% de areia artificial.

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 9 – Curvas granulométricas da composição dos agregados miúdos

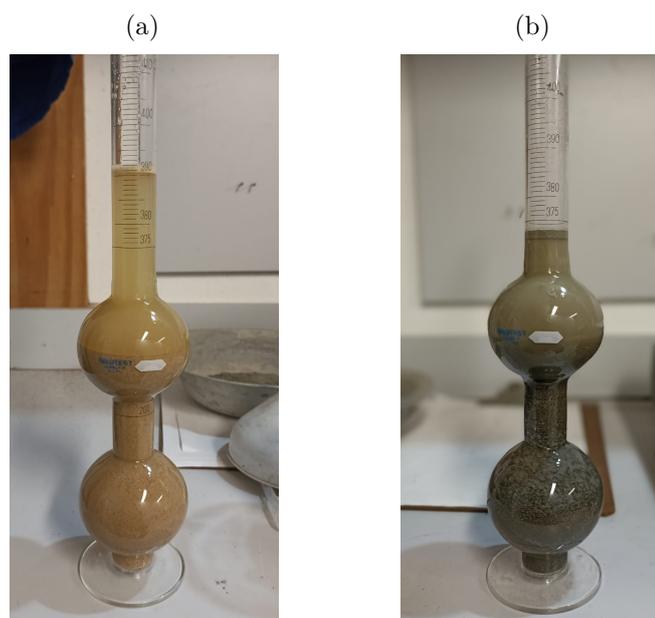


Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.2 Umidade das areias

Nos dias de cada concretagem, antes da preparação e pesagem dos materiais, a umidade dos agregados miúdos (areia natural e artificial) foi aferida pelo método do frasco de Chapman, conforme a NBR 9775 (ABNT, 2011) e ilustrado na Figura 10a e na Figura 10b.

Figura 10 – Determinação da umidade da areia natural (a) e da areia artificial (b) pelo ensaio do frasco de Chapman.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.3 Misturas

O equipamento de mistura disponível no laboratório para a produção dos concretos foi uma betoneira de eixo inclinado com capacidade do tambor igual a 150 litros e velocidade de 28 rotações por minuto. O volume de concreto produzido por cada concretagem ficou sempre próximo de 20 litros, o que representa algo em torno de 13% da capacidade nominal do tambor.

Para compensar a perda de água e de material que ficam aderidos nas pás e nas paredes do tambor, realizou-se, no início de cada sessão de dosagem, a imprimação da betoneira com uma argamassa de mesmo traço e cimento correspondentes aos do concreto a ser dosado.

A introdução dos materiais na betoneira manteve a seguinte ordem: água (80%), brita 0, brita 1, cimento, areia natural, areia de britagem e aditivo superplastificante (80%) diluído em 250 ml de água, sendo o restante da água e do aditivo adicionados aos poucos na betoneira ao longo de todo o processo de mistura, conforme observação e controle da trabalhabilidade e da consistência do concreto.

Inicialmente, os materiais eram misturados por seis minutos. Em seguida, com a betoneira desligada e o cronometro pausado, realizavam-se os primeiros testes práticos de avaliação do teor de argamassa e o *slump test*. Dependendo do estado do concreto fresco, este último ensaio não era realizado e mais quantidades de água ou de aditivo eram introduzidas. O cronometro era então reiniciado, a betoneira religada para mais três minutos de mistura e o mesmo processo se repetia até o concreto atingir a consistência e o abatimento desejado.

4.2.4 Consistência da mistura

A consistência das misturas de concretos foi aferida através do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) normatizado pela NBR 16889 ABNT (2020). O valor do *slump* foi fixado em 140 ± 20 mm para todas as misturas. Quando esta faixa não era atingida, adicionavam-se mais água e/ou aditivo superplastificante até alcançar a trabalhabilidade requerida.

A chapa metálica de base e o cone eram devidamente lavados com água a cada novo ensaio realizado.

4.2.5 Massa específica, ar aprisionado e consumo de cimento

Ao final de cada concretagem, empregou-se o método gravimétrico, descrito na norma NBR 9833 ABNT (2008), para determinar a massa específica do concreto fresco e o teor de ar aprisionado. Estes valores foram usados para o cálculo do consumo de cimento real dos traços.

A Figura 11 ilustra o concreto despejado em um recipiente metálico cilíndrico com 10,01 litros de volume, diâmetro de 21 cm, altura de 30 cm. Seu adensamento foi executado com um vibrador agulha.

Figura 11 – Determinação da massa específica e do teor de ar do concreto fresco.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.6 Corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova (CPs), ilustrados na Figura 12a, obedeceu a norma NBR 5738 ABNT (2016), com a utilização de um vibrador agulha para o adensamento mecânico do material. Para cada traço, moldaram-se seis CPs em fôrmas cilíndricas de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, cobertos com tampa plástica para evitar perda de água por evaporação.

O desmolde ocorreu dois dias após a confecção dos corpos de prova e estes foram devidamente identificados e submersos em tanque de água saturada com cal (Figura 12b), também conforme a NBR 5738 ABNT (2016), garantindo o procedimento de cura até completarem 28 dias de idade.

Figura 12 – Moldagem (a) e cura (b) dos corpos de prova.



Fonte: elaborado pelo autor.

A regularização das extremidades (topo e base) dos corpos de prova foi efetuada por meio de retífica equipada com disco adiamantado e fixação pneumática.

No instante do teste de compressão axial dos corpos de provas, a velocidade média de carregamento manteve-se dentro dos limites de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s estabelecidos pela NBR 5739 ABNT (2018b).

4.3 DESENVOLVIMENTO DAS DOSAGENS

Com o propósito de alcançar o objetivo geral desta pesquisa, optou-se por escolher diferentes tipos de cimento Portland, de um mesmo fabricante, disponíveis na região de Florianópolis-SC. Foram selecionados quatro cimentos e realizaram-se as devidas misturas de concretos, conforme o método IBRACON, sendo possível, por fim, construir os diagramas de dosagem relativos a cada tipo de cimento utilizado.

4.3.1 Considerações e parâmetros iniciais

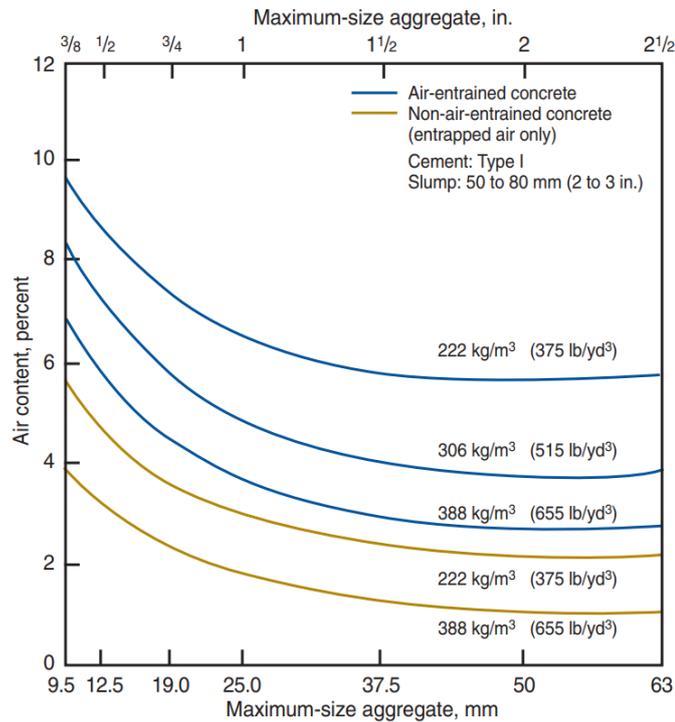
A quase totalidade das centrais de concreto localizadas na Grande Florianópolis utilizam o CP II-F-40 em suas linhas de produção. Portanto, decidiu-se tomar este cimento como referência no presente estudo e, por consequência, foi o cimento utilizado na primeira dosagem realizada no laboratório. Posteriormente, realizaram-se as dosagens referentes aos cimentos CP II-F-32, CP IV-32-RS e CP V-ARI, respectivamente.

Uma das etapas mais importantes do método de dosagem do IBRACON é a determinação do teor de argamassa ideal (α^*) do concreto. Partindo da hipótese — validada no final do estudo — de que a troca do cimento não altera o α^* requerido, este parâmetro foi encontrado apenas na primeira dosagem realizada com o CP-II-F-40 no traço intermediário ($1 : m$), e aplicado a todos os traços do estudo, permitindo a omissão desta etapa nas demais dosagens referentes aos outros tipos de cimento.

A primeira etapa do método escolhido consiste na determinação da proporção ideal entre os agregados graúdos, já descrita na Seção 4.2.1. Em seguida, estipula-se a relação água/cimento (x) inicial e o valor de m . Dado que a resistência nominal do CP II-F-40 é de 40 MPa aos 28 dias e visando a mesma resistência para o concreto dosado, adotou-se $x = 0,50$ ao observar as Curvas de Walz da Figura 5.

Os traços piloto, rico e pobre foram definidos de maneira que o consumo de cimento ficasse entre 280 e 380 kg/cm³. Estes valores foram calculados através da Equação (11), considerando o volume de ar aprisionado no concreto igual a 3% em massa do material. A porcentagem é baseada na Figura 13, a qual mostra a relação entre o tamanho do agregado, o consumo de cimento e o teor de ar aprisionado no concreto. Deste modo, chegou-se a um valor de $m = 6 \pm 1$ e, portanto, aos traços: piloto ou intermediário ($1 : 6$), rico ($1 : 5$) e pobre ($1 : 7$).

Figura 13 – Relação entre o D_{max} do agregado, o consumo de cimento e o teor de ar aprisionado no concreto.

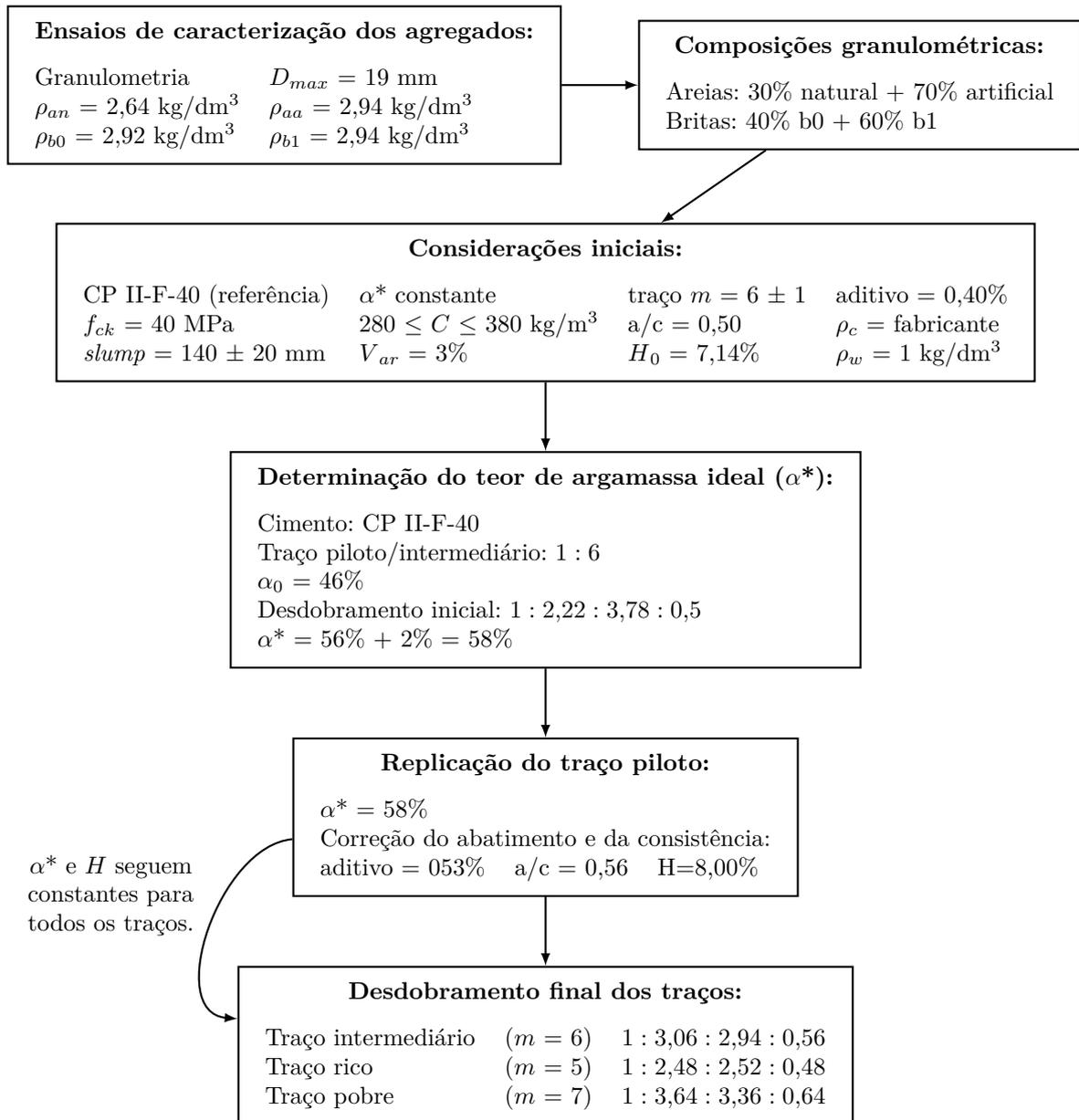


Fonte: Kosmatka e Wilson (2011).

Para atingir a trabalhabilidade estabelecida ($slump = 14 \pm 20$ mm) sem elevar a relação a/c , um estudo envolvendo o consumo de aditivo superplastificante em diferentes cimentos serviu de referência para estimar o valor inicial do teor de aditivo. No trabalho citado, Cecel et al. (2019) avaliaram o desempenho do superplastificante em pastas submetidas ao ensaio de reometria rotacional até ser encontrado os pontos de saturação em cada tipo de cimento. O CP II-F-40 apresentou um teor ótimo de 0,35% em relação à massa do aglomerante. Assim, por arredondamento, optou-se por adotar o valor inicial de 0,40% na presente pesquisa.

O fluxograma da Figura 14 resume as etapas estabelecidas no programa experimental, bem como as considerações e os parâmetros adotados inicialmente para a elaboração dos traços dos concretos.

Figura 14 – Fluxograma das etapas do programa experimental.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.3.2 Determinação do teor de argamassa ideal (α^*)

Encontradas as composições granulométricas dos agregados e tomadas as considerações iniciais, parte-se à etapa mais relevante do método de dosagem do IBRACON: encontrar o teor de argamassa ideal (α^*) da mistura. Para tanto, seguiu-se o procedimento sugerido por Helene e Terzian (1992), Helene e Tutikian (2022) e descrito no item (d) da Seção 3.4.3.3 do presente trabalho.

O Quadro 11 exhibe os cálculos realizados, com auxílio de planilha eletrônica, das quantidades de materiais a serem adicionadas na betoneira e dos acréscimos necessários a cada aumento de 2% de α .

Quadro 11 – Cálculo dos acréscimos de materiais na determinação do teor de argamassa ideal.

Iteração (<i>i</i>)	α (%)	Traço ($m = 6$)			C (kg/m ³)	Quantidade de material adicionada na betoneira (kg)						
		c	a	p		Cimento	Areia Nat. ¹	Areia Art. ¹	Brita 0	Brita 1	Aditivo (g)	Água
1	46	1	2,22	3,78	334,59	6,692	4,480	10,461	10,118	15,177	26,77	3,261 ¹
Adição						0,257	0,466	1,087	-	-		
2	48	1	2,36	3,64	334,42	6,949	4,946	11,548	10,118	15,177		
Adição						0,278	0,503	1,174	-	-		0,480 ²
3	50	1	2,50	3,50	334,25	7,227	5,449	12,722	10,118	15,177	26,77 ²	3,741 ²
Adição						0,301	0,545	1,272	-	-		
4	52	1	2,64	3,36	334,08	7,528	5,993	13,995	10,118	15,177		
Adição						0,327	0,592	1,383	-	-	32,10	0,240
5	54	1	2,78	3,22	333,91	7,856	6,586	15,377	10,118	15,177	58,82	3,981
Adição						0,357	0,646	1,509	-	-	12,20	0,730
6	56	1	2,92	3,08	333,74	8,213	7,232	16,886	10,118	15,177	71,02	4,711
Adição						0,391	0,708	1,652	-	-		
7	58	1	3,06	2,94	333,56	8,604	7,939	18,538	10,118	15,177		
Composição granulométrica do agregado miúdo: areia natural (30%) + areia artificial (70%); Composição granulométrica do agregado graúdo: brita 0 (40%) + brita 1 (60%); Volume de concreto inicial (iteração 1): 20 litros; ¹ Correção da massa pela umidade das areias natural e artificial: 0,52% e 0,59%, respectivamente; ² Quantidade total adicionada ao final da iteração <i>i</i> .												

Fonte: elaborado pelo autor.

Os acréscimos de cimento e areia foram pesados e separados (Foto 15b) previamente às atividades no laboratório a fim de acelerar o processo e minimizar a perda de água da mistura por evaporação durante a dosagem. Contudo, as adições de água e de aditivo não foram calculadas e nem pesadas, pois estas foram acrescentadas na betoneira de forma contingente mediante aferição da trabalhabilidade (*slump test*) e observação da consistência da mistura.

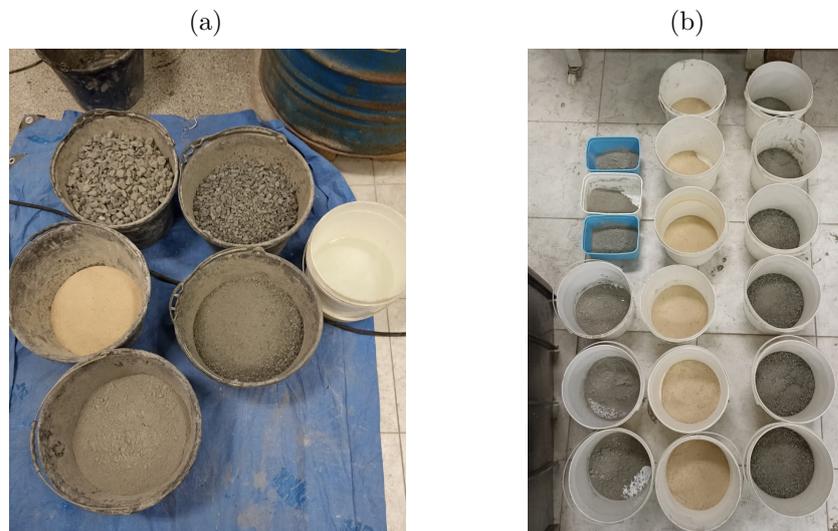
4.3.2.1 Primeira iteração

Como já mencionado, o valor de α^* foi determinado utilizando o cimento referência (CP II-F-40) aplicado no traço intermediário (1 : 6). Partindo do teor de argamassa inicial $\alpha_0 = 46\%$, da relação água/cimento $a/c = 0,50$ e do consumo de cimento calculado teoricamente pela Equação (11), pôde-se desdobrar o primeiro traço (iteração 1) e encontrar as quantidades de material necessárias para vinte litros de concreto, ilustradas na Figura 15a.

Os materiais da iteração 1 (Figura 15a) então foram inseridos na betoneira seguindo a ordem descrita na Seção 4.2.3. Após cinco minutos de mistura, o concreto apresentava-se bem seco e pouco argamassado, mesmo após a adição dos 20% da água

restantes. Desta forma, não houve necessidade de aplicar os testes práticos na mistura fresca e seguiu-se logo para a terceira iteração.

Figura 15 – Pesagem e separação prévia dos materiais da primeira iteração (a) e das adições subsequentes (b).



Fonte: elaborado pelo autor.

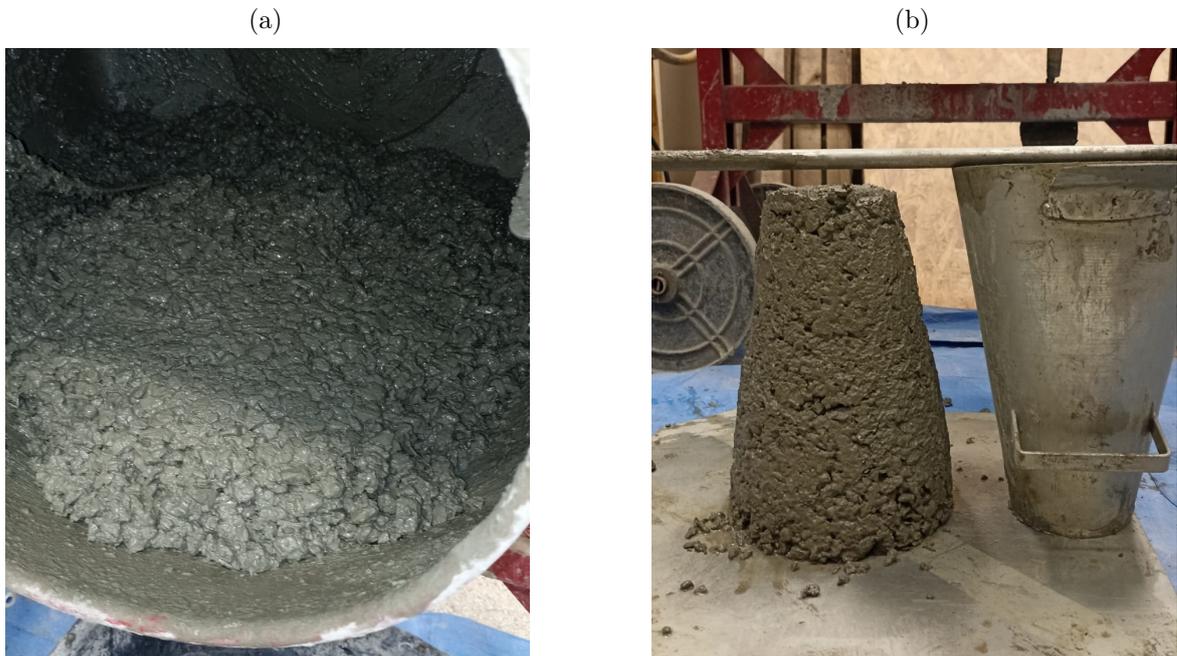
4.3.2.2 Terceira iteração

A partir do segundo traço ($i < 1$), as quantidades de materiais foram calculadas em função da quantidade de agregado graúdo da primeira iteração, sendo esta mantida constante até o final do processo. Assim, calcularam-se apenas as quantidades de cimento e areia relativas a cada iteração, conforme a Equação (22) e a Equação (23), respectivamente, mantendo as proporções iniciais do traço e alterando apenas o valor de α .

Devido a condição do concreto na primeira iteração, decidiu-se adicionar na betoneira dois lotes de acréscimos de material de uma só vez, além da introdução de mais 480 ml de água e dos 20% de aditivo restantes da primeira iteração, alcançado os valores de $\alpha = 50\%$ (iteração 3) e $a/c = 0,52$.

O concreto foi misturado por mais cinco minutos e adquiriu uma consistência melhor, porém sua superfície nivelada dentro da betoneira ainda apresentava-se áspera e com vazios, características também presentes na superfície lateral do concreto após o ensaio de abatimento do tronco de cone ($slump = 25\text{mm}$), como podem ser observadas nas Figuras 16a e 16b.

Figura 16 – Aspecto superficial (a) e consistência ($slump = 25$ mm) (b) do concreto com $\alpha = 50\%$.



Fonte: elaborado pelo autor.

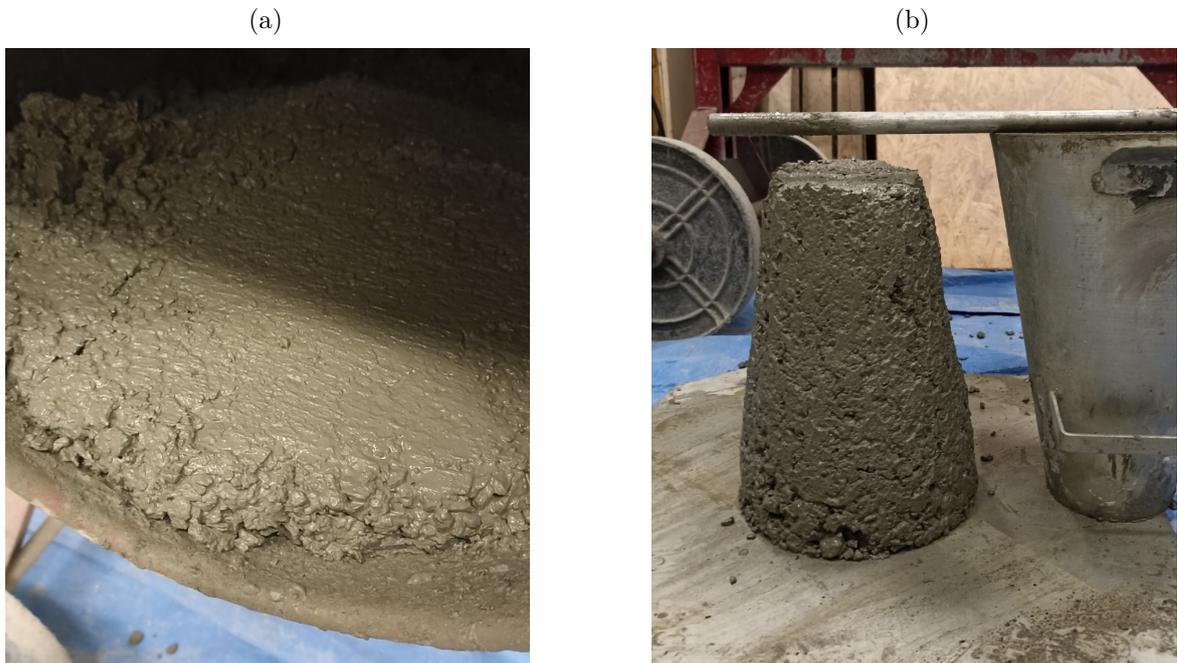
4.3.2.3 Quinta iteração

Novamente, optou-se por adicionar mais dois lotes de acréscimos, passando diretamente para a iteração 5, com $\alpha = 54\%$. Ao longo de dez minutos de mistura, foram introduzidos mais 240 ml de água e 32,1 g de aditivo — justificado pelo fato da trabalhabilidade estar bem longe da requerida.

Neste instante, o concreto estava com $a/c = 0,51$ e obteve um leve aumento no abatimento ($slump = 35$ mm), mas permanecia muito coeso, com consistência de “chiclete”. O teor de argamassa teve melhora significativa, principalmente na textura, porém ainda apresentava alguns vazios na superfície lateral do tronco de cone. As Figuras 17a e 17b ilustram tais observações.

Vale ressaltar que, até este momento, não foi observado nenhum sinal de exsudação.

Figura 17 – Aspecto superficial (a) e consistência do concreto de traço $m = 6$ ($slump = 35$ mm) (b) do concreto com $\alpha = 54\%$.



Fonte: elaborado pelo autor

4.3.2.4 Sexta iteração

Adicionando mais uma porção de cimento e areia — juntamente com 580 ml de água e 12,2 g de aditivo no decorrer de quinze minutos de mistura e intervalos para conferência do *slump* — conseguiu-se atingir um teor de argamassa adequado ($\alpha = 56\%$) e desmanchar a aparência de “chiclete” do concreto.

Entretanto, a trabalhabilidade requerida ainda não tinha sido atingida. Uma vez que o concreto não apresentava exsudação e o teor de aditivo já estava levemente alto (0,86%) em relação ao inicial, optou-se por ajustar o abatimento introduzindo mais 150 ml de água, o que acarretou, por fim, em um $a/c = 0,57$.

As Figuras 18a e 18b mostram o resultado no término do processo: concreto com boa aparência superficial, $slump = 145$ mm, teor de argamassa suficiente, boa coesão sem desprendimento dos agregados e ausência de exsudação.

Figura 18 – Aspecto superficial (a) e consistência do concreto de traço $m = 6$ ($slump = 145 \text{ mm}$) (b) do concreto com $\alpha = 56\%$.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.3.2.5 Replicação do traço $m = 6$

A última etapa, antes de proceder com as dosagens dos traços rico e pobre, consiste em fazer uma nova mistura do traço intermediário, mas desta vez com o valor de α encontrado anteriormente aumentado em 2%, i.e.: $56\% + 2\% = 58\%$.

A relação água/cimento (0,57) e o teor de aditivo (0,86%) encontrados na sexta iteração foram aplicados nesta traço com $\alpha = 58\%$ e usados no cálculo dos quantitativos dos materiais empregados na mistura. Sabendo das perdas de argamassa e, principalmente, de água durante o processo de determinação do α^* , decidiu-se reter 40% do aditivo e 20% da água, sendo este restante adicionado conforme observação da consistência e da trabalhabilidade da mistura.

O Quadro 14 exhibe as quantidades de materiais pesadas inicialmente e o quanto foi utilizado de fato na replicação do traço. Este encerrou o experimento com teor de aditivo de 0,53% e $a/c = 0,56$. As Figuras 19a e 19b ilustram a aparência do concreto, o qual manteve as mesmas características e trabalhabilidade ($slump = 140 \text{ mm}$) observadas no final da sexta iteração, além do fato, evidente, de estar mais argamassado.

Ainda, a contar desta concretagem, iniciou-se a medida da massa específica do concreto fresco e a moldagem dos corpos de prova, conforme os processos já descritos na Seção 4.2.

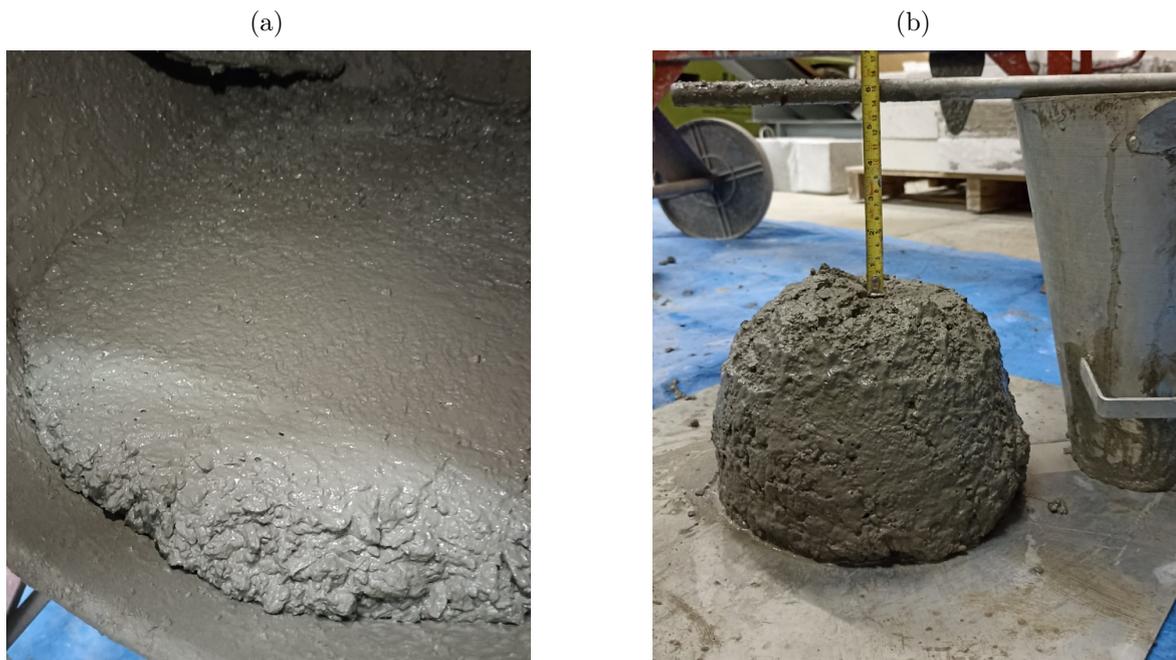
Quadro 12 – Quantidades de materiais adicionadas na betoneira referentes à replicação do traço $m = 6$.

Instante (t)	α (%)	Traço ($m = 6$)			C (kg/m^3)	Quantidade de material adicionada na betoneira (kg)						
		c	a	p		Cimento	Areia Nat. ¹	Areia Art. ¹	Brita 0	Brita 1	Aditivo (g)	Água
Início	58	1	3,06	2,94	324,63	6,493	5,991	13,989	7,635	11,453	57,14	3,653 ¹
Retido											22,86	0,731
Final	58	1	3,06	2,94	324,63	6,493	5,991	13,989	7,635	11,453	34,28 ²	3,521 ²

Composição granulométrica do agregado miúdo: areia natural (30%) + areia artificial (70%);
 Composição granulométrica do agregado graúdo: brita 0 (40%) + brita 1 (60%);
 Volume de concreto inicial (iteração 1): 20 litros;
¹Correção da massa pela umidade das areias natural e artificial: 0,52% e 0,59%, respectivamente;
²Quantidade total adicionada ao final da mistura.

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 19 – Aspecto superficial (a) e consistência do concreto de traço $m = 6$ ($slump = 140$ mm) (b) com $\alpha = 58\%$.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.3.3 Desenvolvimento dos traços auxiliares

Finalmente, a partir dos resultados encontrados para o traço intermediário ($m = 6$), pôde-se definir também os parâmetros dos traços rico ($m = 5$) e pobre ($m = 7$). Estes três traços estão expressos na Tabela 9 e mantiveram-se fixos ao longo do restante da pesquisa, independentemente do tipo de cimento empregado.

Tabela 9 – Definição dos traços rico, intermediário e pobre.

Traço	m	α^*	C (kg/m³)	a	p	Aditivo (%)	H	a/c¹
Rico	5	58	370,13	2,48	2,52	0,53	8%	0,56
Intermediário	6	58	326,82	3,06	2,94	0,53	8%	0,48
Pobre	7	58	292,59	3,64	3,36	0,53	8%	0,64

¹Valores calculados em função de H=8,00% encontrado para o traço intermediário.

Fonte: elaborado pelo autor.

Ressalta-se que o consumo de cimento (C) ainda continuou sendo calculado de forma tórica. O consumo real será usado apenas para a montagem das curvas de dosagem.

Além disso, o valor da relação água/materiais secos encontrado para o traço intermediário ($H = 8\%$) permaneceu constante para os traços auxiliares, conforme enuncia o método de dosagem do IBRACON. O mesmo aconteceu com o valor do teor de argamassa ideal ($\alpha^* = 58\%$).

As produções dos traços rico e pobre ocorreram de maneira similar à replicação do traço intermediário, sendo o restante (20%) das quantidades de água e de aditivo adicionadas por completo durante as concretagens. Portanto, mantiveram-se os mesmos teores e relações H e a/c calculadas inicialmente, indicados na Tabela 9.

Além disso, nota-se através das figuras 20a e 20b que as duas misturas preservaram as mesmas características no estado fresco do traço intermediário — consistência e trabalhabilidade, ausência de exsudação e de desprendimento dos agregados. Foram encontrados os valores dos abatimentos do tronco de cone iguais a 140 mm e 135 mm para os traços rico e pobre, respectivamente.

Por fim, foram coletadas amostras para a determinação da massa específica no estado fresco e moldagem dos corpos de prova.

Figura 20 – Consistências do concreto de traço $m = 5$ ($slump = 140$ mm) (a) e de traço $m = 7$ ($slump = 135$ mm) (b) com $\alpha = 58\%$.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.3.4 Dosagens com os outros tipos de cimento

As dosagens dos concretos fabricados com os outros tipos de cimento foram mais simples, devido ao fato de considerar o mesmo teores de argamassa ideal e de aditivo superplastificante encontrados na dosagem com o cimento referência CP II-F-40, possibilitando a omissão das etapas de definição do α^* e de replicação do traço intermediário ($m = 6$). Desta maneira, foram reproduzidos apenas os três traços definidos na Tabela 9 para cada um dos cimentos restantes considerado nesta pesquisa: CP II-F-32, CP IV-32-RS e CP V-ARI.

Em todos os concretos, a água calculada inicialmente foi adicionada por completo, acarretando na constância da relação água/materiais secos (H) dos concretos, independentemente do tipo de cimento utilizado. Contudo, a quantidade de aditivo foi variada entre os cimentos, sendo este o artifício para manter o $slump$ dentro da faixa estabelecida.

O Quadro 13 resume as quantidades finais de materiais utilizadas na produção dos traços que serão considerados para a montagem das curvas de dosagem, bem como os resultados dos ensaios de abatimento do tronco de cone e a massa do concreto fresco contida em recipiente de volume fixo. Os traços são mostrados na ordem cronológica em que foram produzidos.

Quadro 13 – Quantidades de materiais adicionadas na betoneira referentes à todos os traços.

Cimento	Traço m	Quantidade de material adicionada na betoneira (kg)						
		Cimento	Areia Nat.*	Areia Art.*	Brita 0	Brita 1	Aditivo (g)	Água*
CP II-F-40 ¹	6	6,493	5,991	13,989	7,635	11,453	34,28	3,521
	5	7,403	5,536	12,927	7,462	11,193	39,23	3,449
	7	5,852	6,423	14,998	7,865	11,797	31,01	3,624
CP II-F-32 ²	6	6,539	6,034	14,299	7,690	11,534	32,22	3,338
	5	7,406	5,538	13,125	7,465	11,197	36,29	3,257
	7	5,854	6,425	15,227	7,867	11,801	28,68	3,401
CP IV-32-RS ³	6	6,496	5,995	14,127	7,640	11,460	27,54	3,395
	5	7,351	5,498	12,956	7,410	11,115	31,17	3,306
	7	5,820	6,388	15,054	7,822	11,732	24,68	3,466
CP V-ARI ⁴	6	6,541	6,036	14,181	7,692	11,539	33,65	3,462
	5	7,409	5,541	13,017	7,468	11,202	37,78	3,372
	7	5,856	6,428	15,101	7,870	11,805	29,86	3,534

*Valor corrigido pela pela unidade dos agregados miúdos no instante da mistura:
¹Areia natural e artificial: 0,52% e 0,59%, respectivamente;
²Areia natural e artificial: 0,52% e 2,09%, respectivamente;
³Areia natural e artificial: 0,52% e 1,52%, respectivamente;
⁴Areia natural e artificial: 0,52% e 1,21%, respectivamente.

Fonte: elaborado pelo autor.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados deste estudo, expondo em tabelas e figuras os dados obtidos experimentalmente nos ensaios realizados durante e após às betonadas, relativos ao concreto fresco e endurecido, bem como a plotagem dos diagramas de dosagem conforme o método IBRACON.

Ao mesmo tempo, são feitas análises entre esses resultados, correlacionando suas causas e consequências.

5.1 CONCRETO FRESCO

Determinaram-se a trabalhabilidade do concreto, através do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), e sua massa específica para o cálculo do teor de ar aprisionado e do consumo de cimento real do traço.

5.1.1 Teor de argamassa ideal

Como já citado na Seção 4.3.1, uma das premissas do estudo foi considerar a hipótese de que o teor de argamassa ideal — encontrado na dosagem do concreto com o cimento de referência CP II-F-40 ($\alpha^* = 58\%$) — não sofreria interferência do tipo de cimento e, portanto, não precisaria ser alterado nas demais dosagens.

De fato, tal hipótese se mostrou verdadeira e não houve a necessidade de modificar o α^* quando foram empregados os outros cimentos. Todas as misturas mantiveram o mesmo aspecto superficial, de aparência lisa e coesa, sem de vazios e sem desprendimento da brita, características essas sempre aferidas com os testes práticos recomendados por Helene e Terzian (1992).

No Apêndice A, encontram-se imagens das misturas frescas referentes aos traços intermediários ($m = 6$) dos quatro tipos de cimento estudados, nas quais é possível constatar a similaridade das suas texturas e dos seus estados superficiais.

5.1.2 Relações a/c e H

O Quadro 14 resume os traços unitários finais, em massa, obtidos no desenvolvimento desta pesquisa, bem como os valores de parâmetros definidos a partir do *slump test* e da massa específica.

Quadro 14 – Traços finais e parâmetros dos concretos no estado fresco.

Cimento	Traço ($\alpha = 58\%$)					Slump (mm)	Concreto fresco** (kg)	H (%)	ρ (kg/m ³)	C (kg/m ³)	A (%)
	m	a	p	a/c	Aditivo* (%)						
CP II-F-40	5	2,48	2,52	0,48	0,53	140	24,60	8%	2457,54	379,26	3,64
	6	3,06	2,94	0,56	0,53	140	24,54	8%	2451,55	324,31	3,76
	7	3,64	3,36	0,64	0,53	135	2,52	8%	2449,55	283,53	3,74
CP II-F-32	5	2,48	2,52	0,48	0,49	145	25,28	8%	2525,47	389,77	1,03
	6	3,06	2,94	0,56	0,49	160	24,88	8%	2485,51	328,78	2,46
	7	3,64	3,36	0,64	0,49	125	24,80	8%	2477,52	286,78	2,68
CP IV-32-RS	5	2,48	2,52	0,48	0,42	145	25,28	8%	2525,47	389,53	0,19
	6	3,06	2,94	0,56	0,42	140	25,28	8%	2525,47	333,89	0,18
	7	3,64	3,36	0,64	0,42	125	25,04	8%	2501,50	289,43	1,11
CP V-ARI	5	2,48	2,52	0,48	0,51	155	25,18	8%	2515,48	388,23	1,46
	6	3,06	2,94	0,56	0,51	130	25,08	8%	2505,49	331,42	1,71
	7	3,64	3,36	0,64	0,51	150	24,98	8%	2495,50	288,86	2,00

*Valor relativo a massa de cimento;
**Massa da amostra contida em recipiente cilíndrico metálico com volume igual a 10,01 litros.

Fonte: elaborado pelo autor.

Durante todas as betonadas, optou-se por utilizar toda a água previamente calculada em função das relações água/cimento (a/c) definidas para cada traço na dosagem com o cimento referência. Portanto, os valores 0,48, 0,56, e 0,64 de a/c , referentes aos traços 1 : 5, 1 : 6 e 1 : 7, respectivamente, mantiveram-se constantes e independentes do tipo de cimento.

Consequentemente, visto que para formular os traços rico e pobre, o método do IBRACON orienta manter constante a relação água/materiais secos (H) encontrada no traço intermediário, e sendo esta função de a/c , o valor de H , igual a 8%, também permaneceu invariável ao longo de todo o estudo.

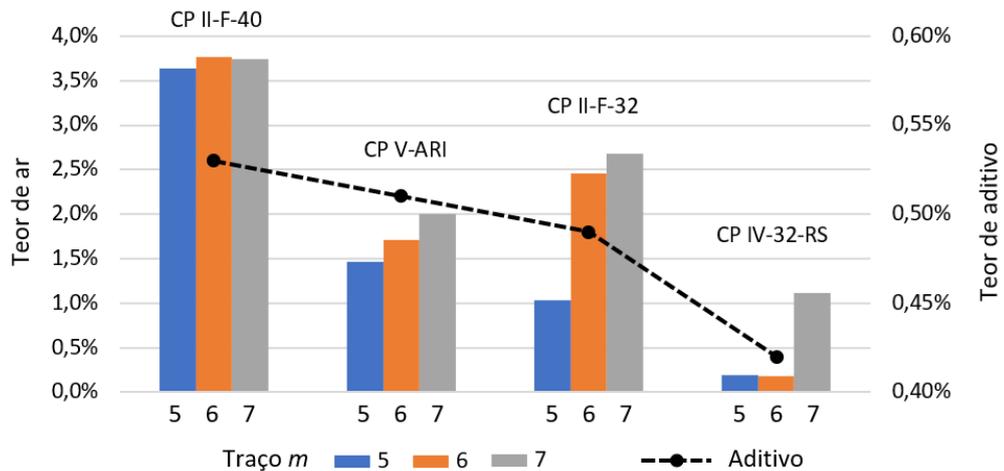
5.1.3 Teor de aditivo e teor de ar aprisionado

O fato de manter H constante para todas as misturas realizadas, implicou em ajustar a trabalhabilidade destas controlando a adição do aditivo superplastificante. O teor de aditivo aplicado teve uma variação máxima de 20,75% e ficou entre 0,53% e 0,42% em relação a massa de cimento, sendo o maior valor relativo ao CP II-F-40 e o menor ao CP-IV-32-RS.

Essa variação na quantidade de aditivo promoveu também uma oscilação no teor de ar do concreto fresco, como já era esperado. Segundo Ferraz e Venancio (2022), os aditivos à base de policarboxilatos, tal qual o utilizado nesta pesquisa, podem aumentar a incorporação de ar no concreto.

O gráfico da Figura 21 mostra com mais clareza como se desenvolveu a interferência do aditivo no teor de ar do concreto e corrobora com a afirmação dos autores supracitados.

Figura 21 – Influência do teor de aditivo superplastificante no teor de ar aprisionado.



Fonte: elaborado pelo autor.

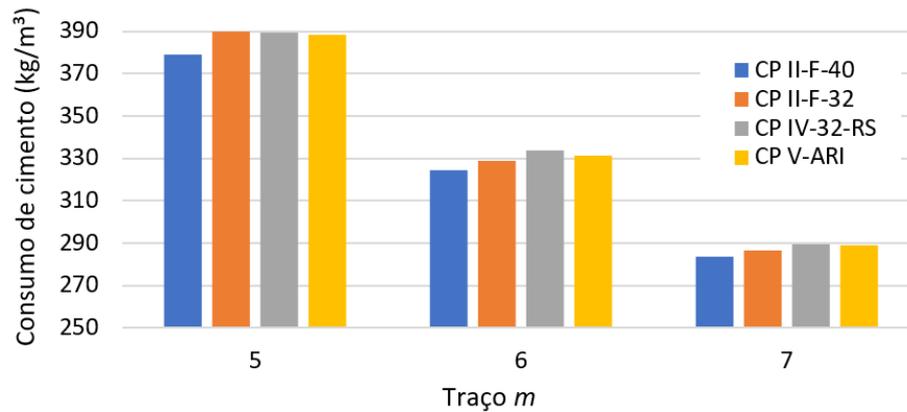
Outra constatação que pode ser feita a partir do gráfico anterior é a de um ligeiro aumento do teor de ar aprisionado com o aumento da relação água/cimento, pois quanto maior é o valor de m , maior é o valor de a/c .

5.1.4 Consumo de cimento

O consumo de cimento (C) real dos traços foi calculado baseado no valor da massa específica do concreto fresco obtida no final de cada betonada. Portanto, dado que os agregados são os mesmos e massa específica dos cimentos são muito próximas, os maiores consumos de cimento são associados aos cimentos que produziram concretos com menores teores de ar, ou seja, mais densos, comparando os C 's de um mesmo traço m , evidentemente.

Da Figura 22, é fácil visualizar que a variação do consumo de cimento em função do tipo de cimento foi bastante pequena. A maior diferença está no traço 1 : 5, no qual o CP-II-F-40 e o CP IV-32-RS apresentaram os valores de 379,26 kg/m³ e de 389,77 kg/m³, respectivamente, uma diferença de 2,64%.

Embora esta diferença seja modesta, a mesma pode representar uma economia de custo considerável na produção do concreto em larga escala.

Figura 22 – Variação do consumo de cimento em função do tipo de cimento e do traço m .

Fonte: elaborado pelo autor.

5.2 CONCRETO ENDURECIDO

5.2.1 Resistência mecânica

No estado endurecido, realizou-se apenas o ensaio de resistência à compressão axial do concreto. Para cada traço, foram ensaiados três corpos de prova rompidos aos 28 dias de idade. Os resultados são expressos no Quadro 15.

Quadro 15 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão axial.

Resistência à compressão axial (MPa)												
Traço (m)	CP II-F-40			CP II-F-32			CP IV-32-RS			CP V-ARI		
	CP	Média	Desv. Pad.	CP	Média	Desv. Pad.	CP	Média	Desv. Pad.	CP	Média	Desv. Pad.
5	44,6	45,1	0,5	39,1	39,5	0,5	41,4	41,3	0,8	51,2	51,3	1,0
	45,3			39,3			40,5			52,3		
	45,5			40,1			42,0			50,4		
6	42,8	40,8	2,4	30,4	30,1	1,0	33,3	33,2	0,4	39,9	40,4	2,0
	38,2			29,0			32,8			38,7		
	41,4			31,0			33,6			42,6		
7	31,8	31,5	0,3	24,8	24,5	0,4	26,4	27,0	0,7	32,3	34,1	3,1
	31,4			24,1			27,7			37,6		
	31,2			24,6			26,9			32,3		

Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando somente esses valores de resistência, conclui-se que o CP V-ARI apresentou melhor performance, seguido pelo CP II-F-40, o qual obteve resistências próximas as daquele, sobretudo nos traços intermediário e pobre. Os concretos fabricados com CP II-F-32 resultaram nas menores resistências em todos os traços.

Já a Tabela 10 contém a relação entre a resistência mecânica e o consumo de cimento de cada traço em função do cimento utilizado. De um modo geral, os traços mais

ricos ($m = 5$) apresentaram melhor desempenho, isto é, proporcionam maiores resistências por quilo de cimento usado. Ainda, nota-se que novamente o CP V-ARI se sobressai em relação aos demais.

Tabela 10 – Relação entre resistência à compressão e o consumo de cimento.

Relação resistência/consumo de cimento (MPa/kg)			
Cimento	Traço		
	5	6	7
CP II F-40	0,12	0,13	0,11
CP II-F-32	0,10	0,09	0,09
CP IV-32-RS	0,11	0,10	0,09
CP V-ARI	0,13	0,12	0,12

Fonte: elaborado pelo autor.

5.3 CURVAS DE DOSAGEM

De posse dos valores das médias das resistências à compressão (f_{cj}), obtidas para cada traço (m), e dos seus respectivos consumos de cimento (C) e relações água/cimento (a/c), pôde-se traçar os diagramas de dosagem dos concretos, objetivo geral deste trabalho, em função dos diferentes tipos de cimento Portland empregados. A Tabela 11 condensa esses resultados citados e usados no cálculo das curvas.

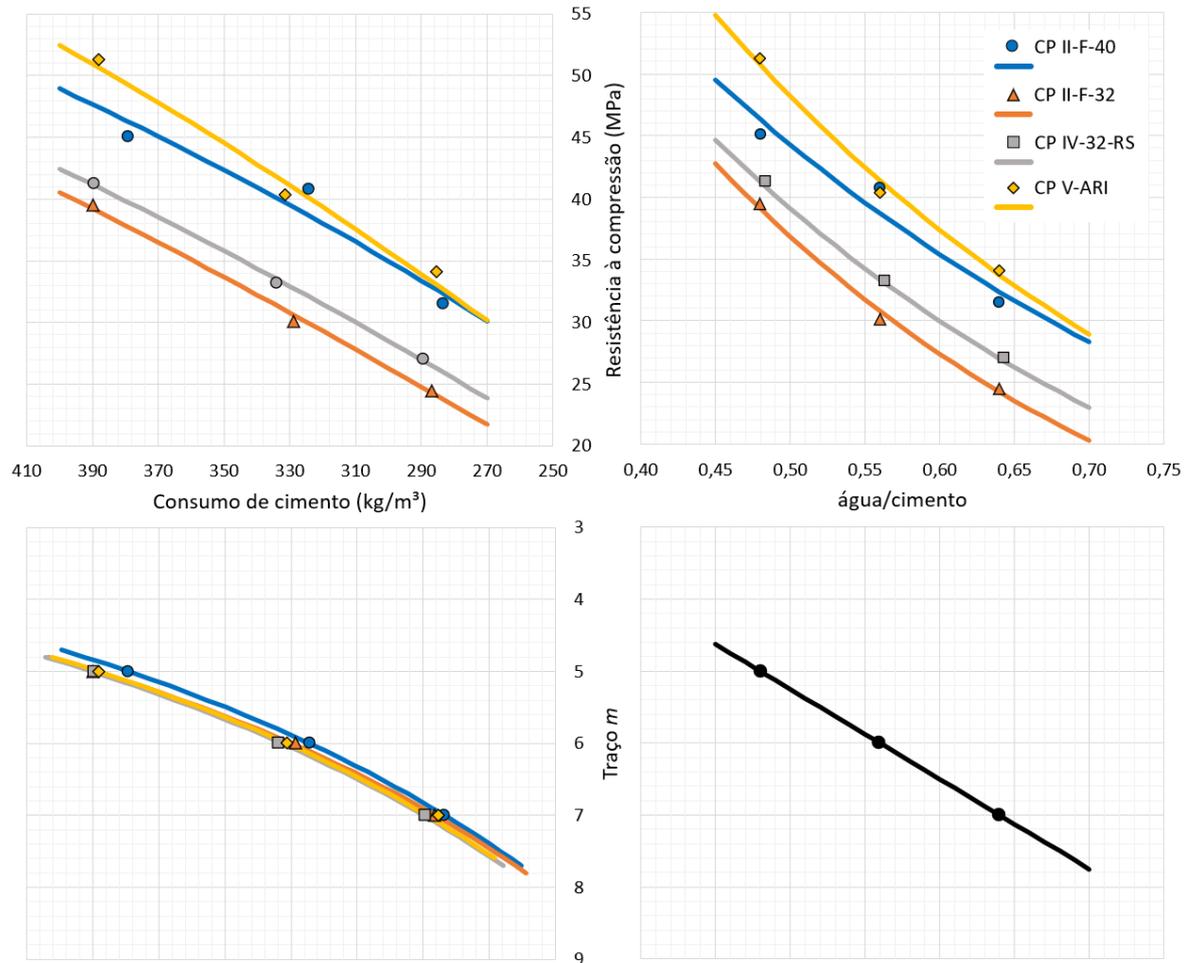
Tabela 11 – Dados utilizados na plotagem das curvas de dosagem.

Cimento	m	a/c	Resistência (MPa)	C (kg/m³)
CP-II-F-40	5	0,48	45,1	379,26
	6	0,56	40,8	324,31
	7	0,64	31,5	283,53
CP-II-F-40	5	0,48	39,5	389,77
	6	0,56	30,1	328,78
	7	0,64	24,5	286,78
CP-II-F-40	5	0,48	41,3	389,53
	6	0,56	33,2	333,89
	7	0,64	27,0	289,43
CP-II-F-40	5	0,48	51,3	388,23
	6	0,56	40,4	331,42
	7	0,64	34,1	288,86

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 23, são apresentadas as curvas referentes aos quatro cimentos em um único ábaco para melhor comparação das alterações causadas pelos mesmos.

Figura 23 – Diagramas de dosagem dos concretos relativos aos cimentos CP II-F40, CP II-F32, CP IV-32-RS e CP V-ARI.



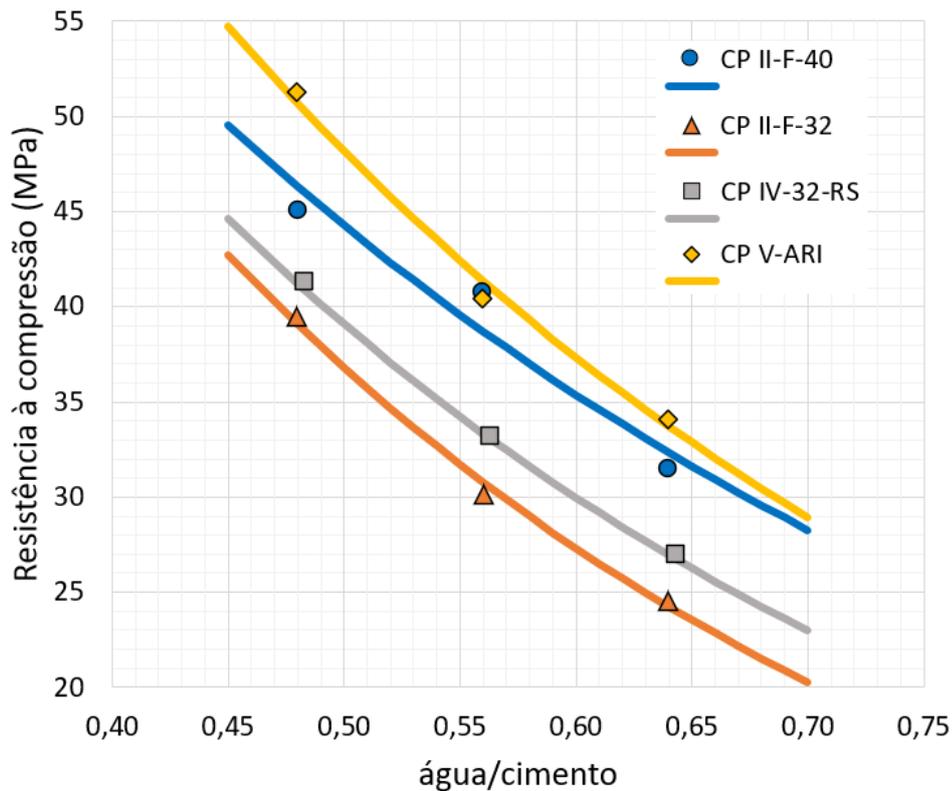
Fonte: elaborado pelo autor.

A seguir serão mostrados, de forma individual, os quadrantes que compõem o ábaco anterior, lembrando que a ordem destes segue o sentido horário. Comentários pertinentes a cada curva também serão apontados, bem como as os coeficientes encontrados das leis clássicas da tecnologia do concreto.

5.3.1 Lei de Abrams

A Figura 24 mostra o 1º quadrante contendo as curvas de Abrams traçadas a partir das equações cujos coeficientes estão exibidos na Tabela 12.

Figura 24 – Curvas de Abrams.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 12 – Coeficientes da Lei de Abrams.

Lei de Abrams	k_i	CP II-F-40	CP II-F-32	CP IV-32-RS	CP V-ARI
$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{(a/c)}}$	k_1	135,9085	163,7263	147,5263	172,6586
	k_2	9,4224	19,7899	14,2451	12,8386
	R^2	0,9390	0,9937	0,9998	0,9905

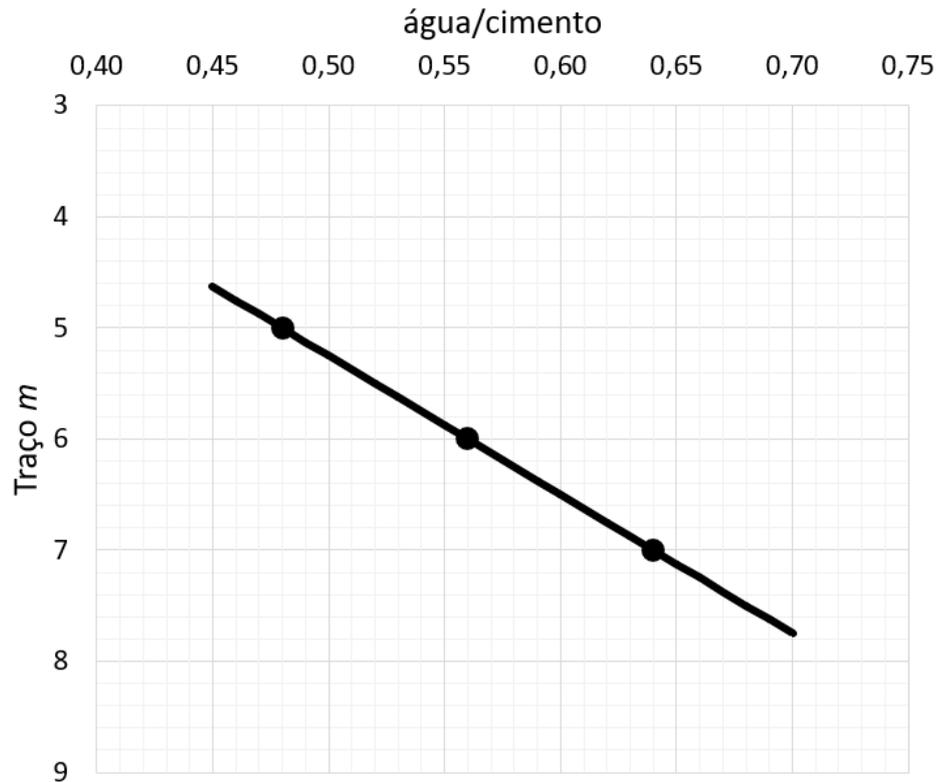
Fonte: elaborado pelo autor.

Como já era esperado, a curva do CP V-ARI ocupou a posição mais elevada do gráfico, indicando os maiores resultados em termos de resistência mecânica para uma dada relação água/cimento, seguido, em ordem decrescente de desempenho, do CP II-F-40, do CP IV-32-RS e do CP II-F-32. Tal fato é atribuído às resistências características à compressão de cada cimento aos 28 dias (Tabela 7), as quais seguem a mesma ordem.

5.3.2 Lei de Lyse

A Figura 25 mostra o 2º quadrante contendo a curva de Lyse traçada a partir da equação cujos coeficientes estão exibidos na Tabela 13.

Figura 25 – Curva de Lyse.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Coeficientes da Lei Lyse.

Lei de Lyse	k_i	CP II-F-40	CP II-F-32	CP IV-32-RS	CP V-ARI
$m = k_3 + k_4 \cdot \frac{a}{c}$	k_3			-1,0000	
	k_4			12,5000	
	R^2			1,0000	

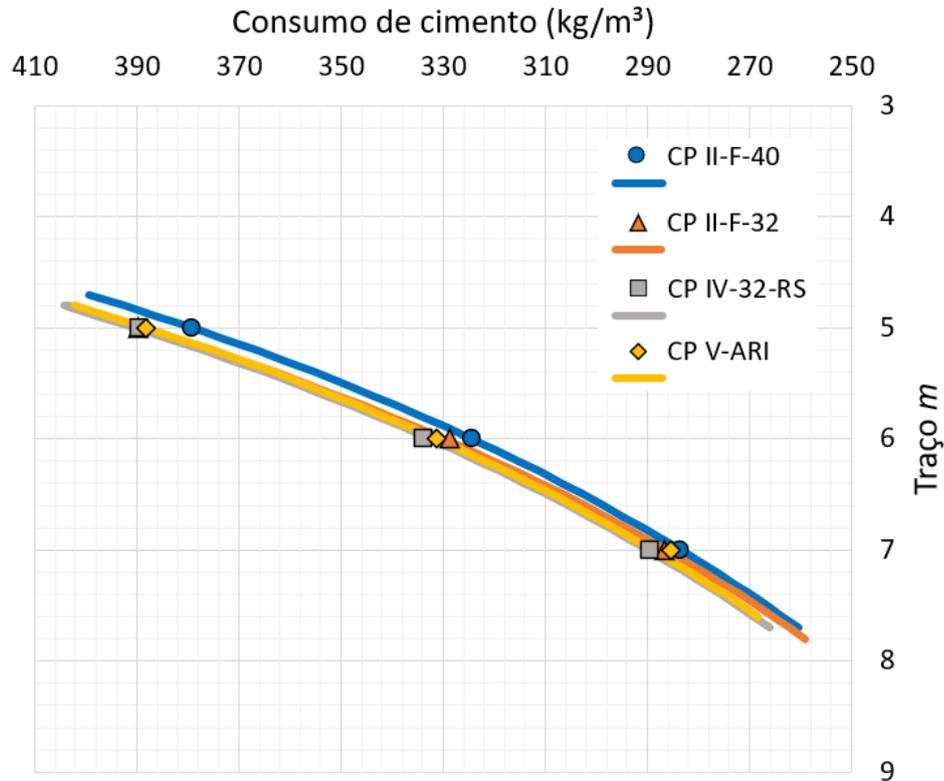
Fonte: elaborado pelo autor.

Como já mencionado, as relações água/cimento (a/c) obtidas para os três traços do estudo de dosagem do cimento referência não sofreram alterações nas dosagens dos concretos com os demais cimentos. Portanto, os três pontos ($a/c; m$) utilizados no traçado da curva de Lyse foram idênticos para todos os cimentos, resultando em apenas uma reta de trabalhabilidade relativa ao abatimento de 140 ± 20 mm.

5.3.3 Lei de Preszkulnik & Kirilos

A Figura 26 mostra o 3º quadrante contendo as curvas de Preszkulnik & Kirilos traçadas a partir das equações cujos coeficientes estão exibidos na Tabela 14.

Figura 26 – Curvas de Preszkulnik & Kirilos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Coeficientes da Lei de Preszkulnik & Kirilos.

Lei de Priszkulnik & Kirilos	k_i	CP II-F-40	CP II-F-32	CP IV-32-RS	CP V-ARI
$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \cdot m}$	k_5	0,4116	0,2673	0,3421	0,3600
	k_6	0,4451	0,4607	0,4439	0,4431
	R^2	1,0000	0,9996	0,9996	1,0000

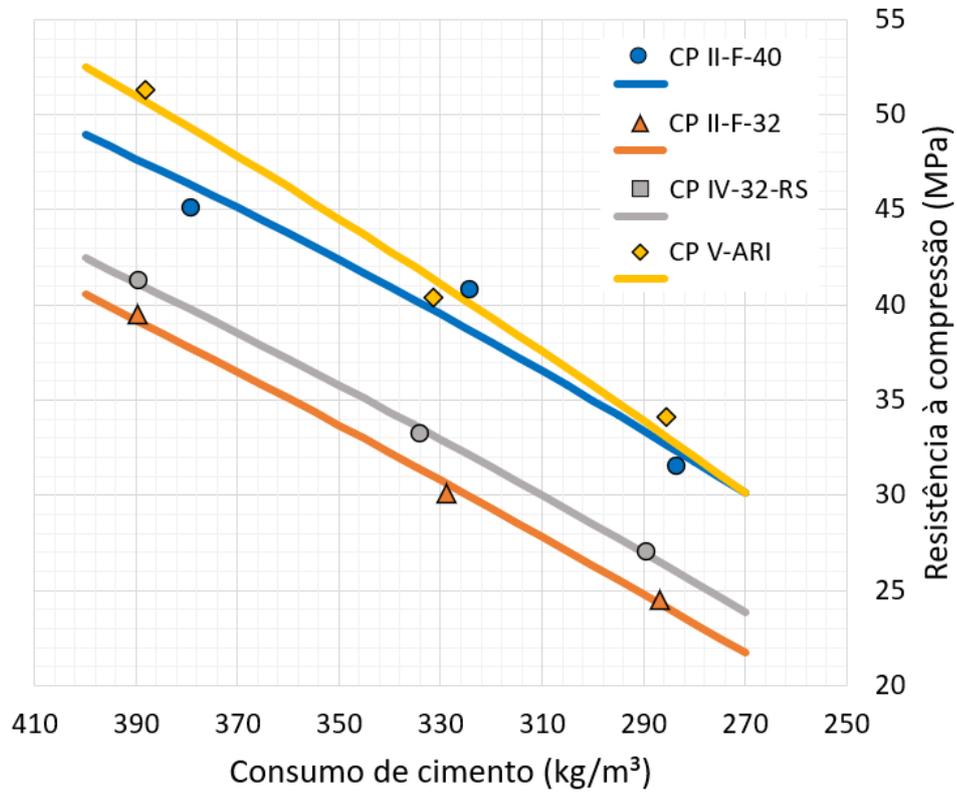
Fonte: elaborado pelo autor.

As curvas de consumo de cimento mostraram-se similares, com destaque à curva do CP II-F40, que demonstrou uma leve diferença às demais curvas em virtude da maior quantidade de ar aprisionado causada pelo maior uso de aditivo superplastificante, acarretando em um pequeno aumento do volume da mistura, e, conseqüentemente, na diminuição do consumo de cimento por metro cúbico de concreto produzido. Fato também está relacionado com a maior finura do CP II-F-40 (Tabela 7), a qual contribuiu para o aumento da demanda de água da mistura.

5.3.4 4º Quadrante

A Figura 27 mostra o 4º quadrante contendo as curvas de rendimento traçadas a partir das equações cujos coeficientes estão exibidos na Tabela 15.

Figura 27 – Curvas de rendimento.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Coeficientes da equação do 4º Quadrante.

4º Quadrante	k_i	CP II-F-40	CP II-F-32	CP IV-32-RS	CP V-ARI
$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{(k_7+k_8(1/C))}}$	k_7	0,0063	0,0330	0,0188	0,0151
	k_8	179,6271	173,8539	180,0676	180,5303
	R^2	0,9379	0,9964	0,9996	0,9901

Fonte: elaborado pelo autor.

No 4º Quadrante do diagrama de dosagem, é possível calcular o rendimento do concreto através da relação entre resistência à compressão e consumo de cimento (MPa/kg). Uma vez que o consumo de cimento não apresentou grandes variações em função do tipo de cimento, a resistência à compressão passa a governar o rendimento do concreto. Desta forma, o CP V-ARI ganha evidência novamente demonstrando ser o cimento de maior rentabilidade, sobretudo em altas resistências.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos no programa experimental deste trabalho, é possível tecer algumas conclusões com relação ao método de dosagem de concreto estabelecido pelo Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) e à influência dos diferentes tipos de cimento Portland no processo e nos parâmetros de dosagem.

O método de dosagem do IBRACON justificou ser um dos mais empregados no país, demonstrando ser possível aplicá-lo sem grandes restrições de materiais e equipamentos e obter o traço do concreto para qualquer resistência em função de uma dada trabalhabilidade. Sua característica teórico-experimental destaca-se na verificação da deficiência ou excesso de argamassa da mistura levando em consideração, implicitamente, as características reais dos materiais utilizados, além do traçado das curvas de dosagem obedecerem leis clássicas e já consolidadas da tecnologia do concreto, garantindo maior precisão e assertividade ao método.

Contudo, ao longo do desenvolvimento do experimento, levantaram-se alguns pontos que merecem uma atenção particular. O primeiro deles é a respeito dos testes práticos e visuais da qualidade e da consistência da mistura sugeridos pelo método para determinar o teor de argamassa ideal (α^*) e trabalhabilidade do concreto. Percebeu-se claramente que a experiência do operador tem influência sobre as características citadas, pois impacta diretamente no tempo de mistura, pela necessidade de realizar mais ou menos testes, e, por consequência, na perda de água de amassamento. No presente estudo, por exemplo, a redução do aditivo superplastificante quando replicado o traço intermediário ($m = 6$) foi de 38% e praticamente mantida a relação água/cimento (de 0,57 para 0,56), justificando o alto teor inicial de aditivo para compensar a perda de água da mistura durante o processo de obtenção do α^* .

Tendo em vista essa problemática, a estratégia de conter uma certa quantidade de aditivo e de água daquela inicialmente calculada antes de adicioná-los à betoneira mostrou-se inteligente, evitando cálculos de correção de traço ou perda total da betonada.

Outra ponto importante a ser levantado é quanto a influência da forma e do empacotamento dos agregados no processo, especialmente no valor de 58% encontrado para o teor de argamassa ideal dos concretos da presente pesquisa. Esse é um número relativamente alto comparado aos concretos usados em obras regulares (48% a 54%), e é explicado por dois motivos: a forma lamelar da areia artificial e das britas de origem basáltica empregadas no estudo, e a máxima massa unitária compactada (MMUC) da composição do agregado graúdo. Tais fatores aumentaram a demanda de argamassa no concreto ao prejudicaram sua trabalhabilidade por tornarem a mistura mais áspera e com maior travamento intergranular, embora a MMUC proporcione maior resistência mecânica ao concreto.

Acerca da influência dos diferentes tipos de cimento Portland no processo e nas curvas de dosagem obtidas pelo método IBRACON, pôde-se obter as seguintes conclusões ao final do estudo:

1. O tipo de cimento não interfere no teor de argamassa ideal do concreto, confirmando a hipótese aplicada no início da pesquisa como premissa das dosagens executadas;
2. O tipo de cimento também não apresenta interferência considerável no seu consumo por metro cúbico de concreto produzido;
3. Uma vez que as relações água/cimento foram mantidas constantes para um mesmo traço, a necessidade de variar a quantidade de aditivo superplastificante adicionada ao concreto para ajustar a trabalhabilidade constata a influência do tipo de cimento na quantidade de água de amassamento requerida. Na ocasião, o CP II-F-40 mostrou-se o cimento mais suscetível a maior demanda de água devido sua maior superfície específica;
4. De um modo geral, o CP V-ARI mostrou melhor performance dentre os cimento analisados, apresentando maiores resistências e rendimento (MPa/kg), sobretudo para concretos com resistências mais altas. O CP II-F-32 apresentou o menor desempenho. Entretanto, o CP IV-32-RS, que possui a mesma resistência nominal daquele, teve desempenho mais elevado. Tal fato demonstra que a adição pozolânica presente no CP IV-32-RS contribui efetivamente para o aumento da resistência mecânica, sobretudo em idades mais avançadas (> 28 dias).

Por fim, o presente trabalho conseguiu alcançar o seu objetivo geral de traçar as curvas de dosagem relativas aos quatro cimentos empregados (CP II-F-40, CP II-F-32, CP IV-32-RS e CP V-ARI), bem como expor as influências causadas por estes na dosagem dos concretos. Assim, será possível fornecer uma ferramenta auxiliar aos engenheiros e tecnólogos do concreto que porventura precisem alterar o tipo de cimento de seus traços ou iniciar um novo estudo de dosagem, sendo este estudo uma forma de contribuir com a previsão dos resultados, reduzir o tempo do processo e guiá-lo realçando as principais mudanças.

6.1 LIMITAÇÕES DAS CONCLUSÕES

As conclusões aqui apresentadas, bem como boa parte das considerações apresentadas ao longo da pesquisa, possuem limitações de validade, pois foram obtidas a partir de ensaios, materiais e condições específicas.

Logo, destaca-se que as considerações relacionadas às alterações provocadas pelos

cimentos na formulação dos concretos do corrente trabalho referem-se a um único método de dosagem; uma faixa de abatimento (140 ± 20 mm); um tipo de aditivo superplastificante, um fabricante específico de cimentos; uma areia natural característica; uma areia artificial e agregados graúdos basálticos; a um dado esqueleto granulométrico; e ao adensamento mecânico dos corpos de prova.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das limitações expostas e das dúvidas que surgiram devido ao avanço do conhecimento após a conclusão da pesquisa, é interessante pautar algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Efetuar a análise de custo da fabricação destes concretos, considerando principalmente os preços dos cimentos e do aditivo; e a análise da emissão de gás carbônico por MPa de resistência de concreto produzido;
- Determinar o teor de máximo desempenho do aditivo superplastificante previamente, a partir de estudos em argamassas compostas com o mesmo tipo de cimento e a mesma composição de agregados miúdos do concreto a ser dosado;
- Realizar o mesmo estudo da influência dos tipos de cimento na dosagem de concretos sem o uso de aditivo, para melhor compreender o comportamento das relações água/cimento e água/materiais secos;
- Avaliar a influência da composição dos agregados graúdos na determinação do teor de argamassa ideal e da trabalhabilidade, variando o módulo de finura total desses agregados.
- Analisar a interferência dos diferentes tipos de cimento no módulo de elasticidade do concreto, através da determinação dos módulos estático e dinâmico, este por meio de ondas ultrassônicas.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 211.1-22**: Selecting proportions for normal-density and high density-concrete - guide. Detroit, 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D854**: Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. West Conshohocken, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Dosagem do concreto pelo método ABCP**. São Paulo, 2020. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2020/07/Metodo_Dosagem_Concreto_ABCPonLINE_22.07.2020.pdf. Acesso em: 03 dez. 2023.
- _____. **Vendas de cimento crescem 11% em 2020**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://abcp.org.br/vendas-de-cimento-crescem-11-em-2020>. Acesso em: 06 dez. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco - determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **NBR 5738**: Agregado miúdo - determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de chapman - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.
- _____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 5738**: Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 16917**: Cimento portland - requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **NBR 5738**: Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **NBR 5738**: Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.
- _____. **NBR 16917**: Agregado graúdo - determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **NBR 16972**: Agregados - determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **NBR 12655**: Concreto de cimento portland - preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento. Rio de Janeiro, 2022.
- _____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - requisitos. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSUNÇÃO, J. W. **Curvas de dosagem para concretos convencionais e aditivados confeccionados com materiais da região noroeste do Paraná**. 254 p. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

- BATTAGIN, A. F. **Cimento Portland**. In: TUTIKIAN, B. F. et al. (Ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2022. v. 1, cap. 6, p. 219–284.
- BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. S. **Cimento Portland**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2017. v. 1, cap. 24, p. 761–792.
- BOGGIO, A. J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland**. 182 p. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- BUCHER, H. R. E. **Estimativa da resistência à compressão de concretos executados com cimento nacional em função da relação água/cimento**. São Paulo: ABCP, 1989.
- CECEL, R. T. et al. **Consumo de aditivo superplastificante em diferentes cimentos e a eficiência dos ligantes**. *Revista IBRACON de estruturas e materiais*, IBRACON, São Paulo, v. 12, p. 1260–1287, 2019.
- CHIDIAC, S. E.; MOUTASSEM, F.; MAHMOODZADEH, F. **Compressive strength model for concrete**. *Magazine of Concrete Research*, ICE, Londres, v. 65, p. 557–572, 2013.
- DYER, T. **Concrete durability**. 1. ed. Londres: CRC Press, 2014.
- FERRAZ, D. F.; VENANCIO, R. J. C. **Aditivos para concreto**. In: TUTIKIAN, B. F. et al. (Ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2022. v. 1, cap. 10, p. 411–448.
- GARSDIE, M. **Global cement production 1995-2021**. 2022. STATISTA. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>. Acesso em: 20 dez. 2022.
- GJØRV, O. E. **Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- HASPARYK, N. P. **Reação álcali-agregado no concreto**. In: TUTIKIAN, B. F. et al. (Ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2022. v. 2, cap. 26, p. 1067–1166.
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.
- HELENE, P. R. L.; TUTIKIAN, B. F. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. In: TUTIKIAN, B. F. et al. (Ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2022. v. 1, cap. 12, p. 485–528.
- KOSMATKA, S. H.; WILSON, M. L. **Design and Control of Concrete Mixtures**. 15. ed. Washington: PCA, 2011.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 4. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Education, 2014.

MELO, C. **Projetos e desenvolvimento de traços - Carta Traço**. Polimix Concreto, Natal, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 2. ed. Edimburgo: Pearson Education Limited, 2010.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 12. ed. São Paulo: Globo, 1993.

PRUDÊNCIO JR, L. R. **Apostila de materiais de construção civil I**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. 230 p. Dissertação de Mestrado — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto (ET-67)**. 3. ed. São Paulo: ABCP, 1998.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Produção nacional de cimento por regiões e estados**. São Paulo, 2020. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1631192445.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2022.

THE CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE (CSI). **Cement Industry Energy and CO2 Performance**. Getting the Numbers Right (GNR). Genebra, 2016. Disponível em: <https://docs.wbcsd.org/2016/12/GNR.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2023.

THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION (CEMBUREAU). **Main world producers in 2020**. Bruxelas, 2020. Disponível em: <https://cembureau.eu/media/ljnpejs2/world-cement-production-in-2020-by-region.jpg>. Acesso em: 20 dez. 2022.

APÊNDICE A – Teor de argamassa

Figura 28 – Aspecto superficial dos concretos de traço $m = 6$.

Fonte: elaborado pelo autor.

ANEXO A – Exemplo de carta traço

Figura 29 – Exemplo de carta traço usual emitida por central dosadora de concreto.

		Projetos e Desenvolvimento de Traços Carta Traço					F-CTT-21 Versão: 00	
Natal, 14 de Dezembro de 2016.								
À Eng. Rodrigo Ref. Obra: Viaduto Igapó								
Prezado Senhor (a),								
Encaminhamos carta traço contendo a dosagem solicitada a ser utilizado na obra em referência.								
Convencional - Abatimento 80±20 mm - Britas 0+1								
fck (MPa)	Cimento (kg/m³)	Areia Fina (kg/m³)	Areia Artificial (kg/m³)	Brita 0 (kg/m³)	Brita 1 (kg/m³)	Água (ml/m³)	Aditivo 1 (ml/m³)	
30,0	335	312	468	315	735	184	2676	
40,0	409	280	420	320	746	184	3271	
Bombeável - Abatimento 100±20 mm - Britas 0+1								
fck (MPa)	Cimento (kg/m³)	Areia Fina (kg/m³)	Areia Artificial (kg/m³)	Brita 0 (kg/m³)	Brita 1 (kg/m³)	Água (ml/m³)	Aditivo 1 (ml/m³)	
30,0	345	313	470	306	715	190	2764	
40,0	422	281	421	311	726	190	3378	
Bombeável - Abatimento 220±30 mm - Brita 0 - Hélice Contínua								
fck (MPa)	Cimento (kg/m³)	Areia Fina (kg/m³)	Areia Artificial (kg/m³)	Brita 0 (kg/m³)	Brita 1 (kg/m³)	Água (ml/m³)	Aditivo 1 (ml/m³)	
20,0	400	434	434	810	-	220	3200	
Informações dos Materiais Aplicados								
MATERIAL	TIPO				FORNECEDOR			
Cimento:	CP V ARI-RS				Mizu - Baraunas			
Agregado Miúdo 1:	Areia Natural Fina				LO Mercadão			
Agregado Miúdo 2:	Areia Natural Artificial				LO Mercadão			
Agregado Graúdo 1:	Brita 12,5 / Granito				Mineração Potiguar- Serrinha			
Agregado Graúdo 2:	Brita 25,0 / Granito				Mineração Potiguar- Serrinha			
Aditivo 1:	Maximent PXT 76				Matchem - Santana de Parnaíba			
Atenciosamente, Camila Melo (84)99139-XXXXXXX								