



**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Bruno Dittberner

**DOSAGEM DE CONCRETO: OTIMIZAÇÃO DO POTENCIAL DOS MATERIAIS NA  
DOSAGEM EXPERIMENTAL DO CONCRETO**

Santa Cruz do Sul

2024

Bruno Dittberner

**DOSAGEM DE CONCRETO: OTIMIZAÇÃO DO POTENCIAL DOS MATERIAIS NA  
DOSAGEM EXPERIMENTAL DO CONCRETO**

Trabalho de conclusão apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da  
Universidade de Santa Cruz do Sul para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dra. Camila Crauss

Santa Cruz do Sul  
2024

## RESUMO

O concreto é um dos materiais mais consumidos e produzidos globalmente, especialmente na construção civil, sendo amplamente empregado em obras de diversas escalas em virtude de suas características de durabilidade, desempenho em relação à água e resistência à compressão. Ademais, é importante ressaltar que o custo da mão de obra e o impacto ambiental associados à produção de cimento são consideravelmente elevados. As vantagens do concreto incluem seu baixo custo, a sua disponibilidade em todas as regiões do Brasil e a cultura de utilização do sistema, que facilita a mão de obra. A produção de concreto tem evoluído continuamente, com melhorias em equipamentos, centrais dosadoras e tecnologias de automação, resultando em maior produtividade e otimização. O presente trabalho tem como objetivo aprimorar a sustentabilidade do concreto por meio da utilização de materiais disponíveis no Rio Grande do Sul, estabelecendo dosagens mais racionais e otimizadas, levando em consideração as condições climáticas e as demandas do mercado. A pesquisa identifica lacunas nos métodos de dosagem que incorporam novos materiais e propõe a definição de parâmetros matemáticos otimizados e econômicos. Os objetivos incluem desenvolver parâmetros que integrem aditivos e adições cimentícias, otimizar o empacotamento da mistura e garantir a durabilidade das estruturas, ao mesmo tempo em que se busca reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. As conclusões evidenciam a complexidade do tema, revelando a eficácia das novas metodologias, como a inclusão de novos materiais, que resultaram em melhorias significativas na trabalhabilidade e no desempenho mecânico do concreto, permitindo reduções no consumo de cimento sem comprometer a qualidade, além de abrir caminhos para investigações futuras sobre a otimização e incorporação de novos materiais, promovendo um desenvolvimento mais sustentável.

**Palavras-chave:** Concreto. Impacto Ambiental. Durabilidade. Dosagem. Otimização. Empacotamento. Adições. Aditivo. Resistência. Desenvolvimento

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Curva de Fuller e Thompson.....	21
Tabela 2 – Consumo de Água ABCP .....	31
Tabela 3 – Volume Compactado Seco ABCP .....	32
Tabela 4 – Tabela 6 da NBR 7211:2022 .....	49
Tabela 5 – Tabela de Correlação do Diâmetro e % de Material.....	51
Tabela 6 – Tabela granulométrica NBR 7211:2022 .....	52
Tabela 7 – Condições de Preparo do Concreto .....	67
Tabela 8 – Valor de G .....	69
Tabela 9 – Fator H .....	72
Tabela 10 – Proporções de agregado graúdo total .....	74
Tabela 11 – Proporções de aglomerante / agregado graúdo .....	74
Tabela 12 – Traço ABCP .....	84
Tabela 13 – Traço ACI .....	84
Tabela 14 – Traço IPT.....	84
Tabela 15 – Ensaio granulométrico da areia média .....	85
Tabela 16 – Ensaio granulométrico areia grossa .....	86
Tabela 17 – Caracterização finais dos agregados miúdos.....	86
Tabela 18 - % Material retido no ensaio na brita 19,0mm .....	89
Tabela 19 - % Material retido no ensaio na brita 9,5mm .....	89
Tabela 20 – Resultados dos ensaios físicos da brita 19,0mm.....	91
Tabela 21 – Resultados dos ensaios físicos da brita 9,5mm.....	92
Tabela 22 – Resultados da massa específica do AG200 .....	92
Tabela 23 – Apresentação dos Traços.....	97
Tabela 24 – Consumos iniciais de água e abatimento .....	98
Tabela 25 – Perdas de abatimento e adições de água .....	100
Tabela 26 – Abatimentos finais S2.....	101
Tabela 27 – Relações água/traços iniciais .....	102
Tabela 28 – Avaliação dimensional dos cp's em 7 dias .....	104
Tabela 29 – Avaliação dimensional dos cp's em 14 dias .....	104
Tabela 30 – Avaliação dimensional dos cp's em 28 dias .....	105
Tabela 31 – Avaliação dimensional dos CP'S em 56 Dias.....	106
Tabela 32 – Resultados dos ensaios a compressão aos 7 Dias .....	106

Tabela 33 – Resultados dos ensaios a compressão aos 14 Dias .....	107
Tabela 34 – Resultados dos ensaios a compressão aos 28 Dias .....	108
Tabela 35 – Resultados dos ensaios a compressão aos 56 Dias .....	110
Tabela 36 - Resultados dos ensaios nos Módulos de elasticidade aos 28 dias .....	112
Tabela 37 – Resultados dos métodos de referência no canteiro.....	115
Tabela 38 – Resultados dos traços de referência .....	116

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – História do concreto .....	17
Figura 2 – Curva da relação a/c de Abrams .....	22
Figura 3 – Dosagem SNCF .....	23
Figura 4 – Efeito do filler Calcário no Concreto .....	43
Figura 5 - Teor de Agregado Graúdo x Abatimento x EC.....	46
Figura 6 - Agregado Graúdo x EC.....	47
Figura 7 – Diâmetro do agregado graúdo e resistência .....	48
Figura 8 – Ensaio Granulometria dos Agregados Miúdos .....	58
Figura 9 – Ensaio da Determinação da Massa Específica do Agregado Miúdo .....	59
Figura 10 – Ensaio da determinação da massa específica do agregado graúdo 19,00mm .....	60
Figura 11 - Diagrama do Efeito de Empacotamento de Partículas.....	63
Figura 12 – Ensaio da Massa Específica do Filler Calcário.....	65
Figura 13 – EQUIPAMENTO PARA SLUMP TEST.....	78
Figura 14 – Discos de Neoprene.....	81
Figura 15 – COTAS DE AVALIAÇÃO DIMENCIONAL.....	82
Figura 16 – Tipos de ruptura dos corpos de prova .....	83
Figura 17 – Abatimento inicial traço BS20 .....	99
Figura 18 – Traço BS50 pelo ensaio de abatimento e dentro da betoneira .....	99
Figura 19 – Abatimento S2 traço BS35.....	101
Figura 20 – Cura inicial e cura final em água .....	103
Figura 21 – Ensaio de compressão CP02, traço BS45 em 7 Dias .....	107
Figura 22 – Ruptura “A” CP04 do traço BS50 aos 28 dias de idade .....	108
Figura 23 – CP05 do Traço BS45 ensaiado com carbono a compressão.....	109
Figura 24 – Antes x Depois CP05 traço BS35 aos 28 Dias.....	109
Figura 25 – Ensaio do módulo de elasticidade do CP07 BS20 aos 28 Dias .....	113
Figura 26 – CPS de referência .....	116

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Lei de Lyse .....	19
Equação 2 – Lei de Molinari .....	20
Equação 3 – Modelo de Andreasen e Andersen .....	25
Equação 4 – Equação de Fuller .....	51
Equação 5 – Curva de Bolomey .....	52
Equação 6 – Resistência FCJ .....	66
Equação 7 – Fator Água x Resistência (FAR).....	68
Equação 8 – Fator de Consumo de Água (CAG) .....	68
Equação 9 – Fator Aglomerante (AGE).....	70
Equação 10 – Fator Filler (%).....	70
Equação 11 – Adição de Cimento Excedente Inicial .....	71
Equação 12 – Adição Mínima de Cimento Final.....	71
Equação 13 – Água Mínima .....	71
Equação 14 – Água Máxima .....	71
Equação 15 – Quantia Necessária de Água .....	72
Equação 16 – Taxa de Variação da Quantia de Água .....	72
Equação 17 – Determinação do consumo de agregado graúdo .....	73
Equação 18 - % 19,0mm .....	75
Equação 19 – % 9,5mm .....	75
Equação 20 – Quantia de agregado miúdo .....	76
Equação 21 – Volume corrigido da areia média.....	76
Equação 22 – Volume corrigido da areia grossa.....	76
Equação 23 – Cálculo da resistência a compressão.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Cm	Centímetro (s)
CP	Corpo de prova
cp's	Corpos de provas
Eci	Módulo de elasticidade
Fck	Resistência característica do concreto à compressão
Fct	Resistência do concreto a tração
Kg	Quilograma
KN	Quilo Newton
M <sup>3</sup>	Metro cúbico
Mm	Milímetro (s)
MPa	Mega Pascal
t	Tonelada
a/c	Relação água / cimento
y	Massa específica dos materiais
a	Relação do agregado miúdo seco e cimento
P	Relação do agregado graúdo seco e cimento
FF	Fator Filler
C3S	Silicato tricálcico
C3A	Aluminato de cálcio
S0	Slump inicial
S1	Slump intermediário
S2	Slump final

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Problema de Pesquisa .....	15
1.2. Questão de Pesquisa .....	15
1.3. Objetivo Geral .....	15
1.4. Objetivos Específicos .....	15
1.5. Justificativa.....	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO .....	17
2.1. Breve histórico sobre o surgimento do concreto .....	17
2.2. Primeiros estudos envolvendo concreto.....	18
<b>2.2.1. Lei de Lyse (1932).....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2. Lei de Molinari ou Lei de Prizskulnik e Kirilos (1974).....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.3. Feret (1892).....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.4. Fuller e Thompson (1907). .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.5. Duff Abrams (1918).....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.6. Roger Vallette (1949) .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.7. Curva de Faury (1999) .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.8. Jules Bolomey (1925) .....</b>	<b>24</b>
2.3. Empacotamento das partículas dos agregados .....	24
<b>2.3.1. Andreasen e Andersen.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.2. Powers .....</b>	<b>25</b>
2.4. Contextualizando os métodos difundidos atualmente .....	26
<b>2.4.1. Método ACI.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.2. IPT-EPUSP .....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.3. Método da ABCP.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.4. Método Ibracon .....</b>	<b>32</b>
2.5. Semelhanças de abordagens entre os métodos .....	35
2.6. Escolha e determinação dos agregados no concreto .....	36
<b>2.6.1. Principais características .....</b>	<b>36</b>
2.6.1.1. Escolha do tipo e características dos cimentos.....	37

<b>2.6.2. Água de amassamento</b> .....	<b>38</b>
<b>2.6.3. Consumo de cimento</b> .....	<b>39</b>
2.7. Adições minerais.....	40
2.8. Adições pozolânicas.....	41
2.9. Adições carbonáticas .....	42
2.10. Agregados secos .....	44
<b>2.10.1. Definições</b> .....	<b>44</b>
<b>2.10.2. Agregado graúdo</b> .....	<b>45</b>
<b>2.10.3. Agregado miúdo</b> .....	<b>50</b>
2.11. Adição de aditivos.....	53
3. METODOLOGIA.....	54
3.1. Definições .....	56
3.2. Escolha dos agregados.....	57
<b>3.2.1. Caracterização dos agregados miúdos</b> .....	<b>57</b>
<b>3.2.2. Caracterização dos agregados graúdos</b> .....	<b>60</b>
<b>3.2.3. Caracterização do tipo de cimento</b> .....	<b>60</b>
3.2.3.1. Determinação da resistência a compressão .....	61
<b>3.2.4. Caracterização das adições</b> .....	<b>62</b>
3.2.4.1. POZOMIX DURABILITY 7510.....	62
3.2.4.2. Filler calcário (AG200) .....	64
<b>3.2.5. Aditivos</b> .....	<b>65</b>
3.3. Escolha dos parâmetros iniciais do concreto .....	66
<b>3.3.1. ETAPA 1 – Resistência FCJ</b> .....	<b>66</b>
<b>3.3.2. ETAPA 2 - Determinação do fator água x resistência</b> .....	<b>67</b>
<b>3.3.3. ETAPA 3 - Primeira estimativa do consumo de água</b> .....	<b>68</b>
<b>3.3.4. ETAPA 4 - Determinação do consumo de aglomerante</b> .....	<b>69</b>
<b>3.3.5. ETAPA 5 - Determinação do consumo de adição</b> .....	<b>70</b>
<b>3.3.6. ETAPA 6 – Consumo de cimento</b> .....	<b>71</b>
<b>3.3.7. ETAPA 7 – Determinação da quantia de agregado graúdo</b> .....	<b>73</b>
<b>3.3.8. ETAPA 8 –Determinação da quantia de agregado miúdo</b> .....	<b>75</b>

3.4.	Procedimentos realizados no canteiro .....	76
3.4.1.	<b>Pesagem e preparo dos materiais.....</b>	<b>76</b>
3.4.2.	<b>Procedimento de mistura:.....</b>	<b>77</b>
3.4.3.	<b>Cortes de água iniciais: .....</b>	<b>77</b>
3.4.4.	<b>Ensaio pelo tronco de cone (SLUMP TEST).....</b>	<b>77</b>
3.4.5.	<b>Determinação das perdas de abatimento:.....</b>	<b>78</b>
3.4.6.	<b>Correção da relação de abatimento inicial:.....</b>	<b>79</b>
3.4.7.	<b>Moldagem dos corpos de prova 100x200mm: .....</b>	<b>79</b>
3.4.8.	<b>Massa específica e índice de ar incorporado:.....</b>	<b>80</b>
3.4.9.	<b>Cura inicial e final .....</b>	<b>80</b>
3.4.10.	<b>Preparo dos corpos de prova:.....</b>	<b>80</b>
3.4.11.	<b>Avaliação dimensional .....</b>	<b>81</b>
3.4.12.	<b>Ensaio de compressão.....</b>	<b>82</b>
3.4.13.	<b>Ensaio de módulo de elasticidade: .....</b>	<b>83</b>
3.5.	Determinação dos traços de referências.....	84
4.	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>85</b>
4.1.	Resultados físicos dos agregados miúdos secos.....	85
4.2.	Resultados dos ensaios físicos dos agregados graúdos.....	88
4.3.	Caracterização física do filler calcário: .....	92
4.4.	Caracterização da Pozomix 7510: .....	93
4.5.	Resistência do cimento .....	93
4.6.	Dosagem dos aditivos .....	93
4.7.	Concepção da curva de dosagem.....	93
4.7.1.	<b>ETAPA 1: Resistência de projeto FCJ .....</b>	<b>93</b>
4.7.2.	<b>ETAPA 2: Determinação do fator água x resistência .....</b>	<b>94</b>
4.7.3.	<b>ETAPA 3: Estimativa do consumo inicial de água.....</b>	<b>94</b>
4.7.4.	<b>ETAPA 4: Determinação da Quantia de Aglomerante .....</b>	<b>94</b>
4.7.5.	<b>ETAPA 5: Estimativa da Quantia de Adição Principal.....</b>	<b>95</b>
4.7.6.	<b>ETAPA 6: Cimento excedente e adição mínima.....</b>	<b>95</b>
4.7.6.1.	<b>ETAPA 6.1: Verificação das quantias de aglomerantes .....</b>	<b>95</b>
4.7.7.	<b>ETAPA 7: Determinação do agregado graúdo .....</b>	<b>96</b>
4.7.8.	<b>ETAPA 8: Determinação do agregado miúdo.....</b>	<b>96</b>

4.8.	Apresentação dos Traços Individuais:.....	97
4.9.	Resultados no canteiro:.....	98
<b>4.9.1.</b>	<b>Consumos Iniciais de Água e Abatimentos .....</b>	<b>98</b>
<b>4.9.2.</b>	<b>Determinação da perda de abatimento (manutenção): .....</b>	<b>100</b>
<b>4.9.3.</b>	<b>Abatimentos finais.....</b>	<b>101</b>
<b>4.9.4.</b>	<b>Relações água/aglomerantes resultantes .....</b>	<b>102</b>
<b>4.9.5.</b>	<b>Avaliação dimensional dos corpos de prova .....</b>	<b>103</b>
<b>4.9.6.</b>	<b>Determinação da resistência a compressão .....</b>	<b>106</b>
<b>4.9.7.</b>	<b>Determinação do módulo de elasticidade estático.....</b>	<b>112</b>
4.10.	Relações água/aglomerantes resultantes .....	114
4.11.	Resultado dos métodos de referências.....	115
<b>4.11.1.</b>	<b>Resultados dos ensaios a compressão das referências .....</b>	<b>116</b>
5.	CONCLUSÕES.....	117
6.	REFERÊNCIAS .....	119

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto vem sendo, a muito tempo, um dos materiais mais consumidos e produzidos no mundo, na área da construção civil (SCHNEIDER et al., 2011). Sendo introduzido ao sistema construtivo de concreto armado, que, por sua vez, é amplamente utilizado em obras de pequenos a grandes portes, devido aos inúmeros benefícios que esta combinação de concreto e aço pode beneficiar, por sua durabilidade, desempenho tanto em relação a água, quanto a resistência a compressão, acessibilidade, custo da mão de obra, custo energético e ambiental da produção de cimento é alta em relação a outros materiais (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A vantagem do concreto é o baixo custo dos materiais, disponibilidade em todas as regiões do Brasil, durabilidade e cultura de utilização do sistema, facilitando encontrar mão de obra e com isso, entramos em um fator de extrema importância atualmente, a sustentabilidade e a capacidade de ser cada vez mais eficiente economicamente, logo o presente trabalho busca, uma forma de melhorar a sustentabilidade do material, o concreto. Inegavelmente, o uso do concreto tornou-se comum ao redor do mundo, seja pela disponibilidade afluyente de seus elementos e pela sua versatilidade em estruturas que demandam elevadas solicitações de desempenho com um custo inferior aos demais sistemas construtivos, em suma maioria. (SCHNEIDER et al., 2011)

A forma que produzimos o concreto, por sua vez, vem sendo cada vez mais atualizada, e passaram por várias melhorias com o passar do tempo, que vão desde equipamentos de pré-mistura, centrais dosadoras, transporte do concreto fresco, conservação dos materiais, capacitação dos envolvidos dentro das centrais, tecnologias aplicadas as automações, possibilitando uma produtividade cada vez maior e mais otimizada na concepção do concreto. Devido ao crescimento acentuado deste material observa-se o crescimento de pesquisas relacionada aos agregados, sejam os agregados secos ou adições que constituem o concreto, materiais novos, materiais ecológicos, materiais capazes de substituir em partes, os consumos de cimento e custos do concreto. (GHODDOUSI; SHIRZADI JAVID; SOBHANI, 2014)

De um ponto de vista global, ouve um incremento ao longo dos anos de pesquisas e desenvolvimentos dos materiais que constituem o concreto, as adições, no próprio cimento, aditivos, agregados secos, modo em que estes materiais são

misturados, logo, no que diz respeito a otimização e retornos econômicos, podemos notar um crescimento em vários cenários, porém, a implantação destes materiais, muitas vezes acontece por meios experimentais, com base científica em métodos difundidos criados em cenários que não haviam tais materiais, com suas propriedades e consequências ao concreto.(HELENE; TERZIAN, 1993)

Os parâmetros que serão apresentados e aplicados na metodologia deste trabalho, relacionam a utilização de materiais sobre a produção de concreto em centrais, no Rio Grande do Sul, afim de estabelecer uma conexão de dosagens mais racionais e otimizadas nas curvas de dosagens, tendo em vista as condições climáticas no cenário atual, os materiais disponíveis na região, e as aplicabilidades mais comuns do mercado.

Também, não reforça a ideia de uma comparação de resultados, e dos métodos envolvidos, desde os métodos já presentes no atual cenário, como o método experimental em desenvolvimento. Tendo em vista que, os processos de dosagem dos métodos convencionais estimam quantias de aglomerantes diferentes em suma maioria, levando em conta a disponibilidade dos materiais de cada região e suas características específicas, por isso, o objetivo principal deste estudo remete a ideia de que, com estimativas minoradas e com a incorporação de materiais recentes que estão sendo oferecidos no mercado, é possível atingir os desempenhos mecânicos e ambientais requeridos pelas normas que regem o Brasil.

Em conclusão, será realizada comparações de resultados mecânicos obtidos nos ensaios de compressão axial, e demonstrar a proximidade dos resultados com consumos inferiores, e resultados satisfatórios.

### **1.1. Problema de Pesquisa**

A lacuna em novas pesquisas sobre métodos de dosagem que incorporam novos materiais e a falta de avanços nessa área representa um obstáculo significativo para o desenvolvimento de tecnologias e tratamentos mais eficazes.

### **1.2. Questão de Pesquisa**

Como podemos utilizar os estudos e métodos difundidos atualmente, juntamente aos estudos relacionados a otimização dos materiais e ensaios experimentais para definir parâmetros matemáticos otimizados e mais econômicos para as dosagens de concreto, atendendo as normas brasileiras e as durabilidades das estruturas?

### **1.3. Objetivo Geral**

- Desenvolver parâmetros capazes de incorporar os materiais disponíveis no atual meio, como aditivos, e adições cimentícias, e a otimização do empacotamento da mistura afim de atender aos requisitos previstos e reduções no consumo de cimento.

### **1.4. Objetivos Específicos**

- Identificar e caracterizar materiais específicos, entendendo as reatividades geradas no concreto fresco a partir de ensaios experimentais.
- Descrever os parâmetros adotados pelos métodos já presentes e suas particularidades.
- Equiparar os métodos disponíveis com a pesquisa em desenvolvimento.
- Desenvolver uma curva de dosagem a partir dos parâmetros do método experimental e avaliar o desempenho desde o concreto fresco até a fase endurecida.
- Aplicar parâmetros específicos afim de otimizar o empacotamento da mistura.

## **1.5. Justificativa**

Dia após dia, observou-se uma demanda expressiva do material no decorrer dos anos (HELENE; TUTIKIAN, 2011), contudo, a baixa nos estudos recentes no campo voltado para as empresas que prestam serviços de fornecimento de concreto no Brasil, tem apresentado um déficit no que diz respeito a sustentabilidade, agressividade ambiental das formulações e desenvolvimento de novas aplicações, materiais, e as possibilidades disponíveis para incorporações dentro das centrais dosadoras. Com isso, optou-se pela realização deste trabalho com o intuito de avaliar diferentes tipos de dosagens, formulações, e desenvolver um método capaz de suprir os desempenhos mecânicos exigidos pelas normas brasileiras, garantir a vida útil das estruturas e reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) associada a produção de cimento, principal responsável pelo impacto ambiental nesse meio.

A busca por soluções que contemplem a integração de novos materiais e tecnologias é crucial para impulsionar o progresso e abrir novas possibilidades no domínio da dosagem em diferentes áreas de estudo. (DEWAR; ANDERSON, 2003)

É fundamental que a comunidade científica explore abordagens inovadoras e colaborativas para preencher essa lacuna e impulsionar a evolução do conhecimento em dosagem de materiais. Portanto, a importância deste estudo está nas alterações tecnológicas atualmente disponíveis, trazendo benefícios e vantagens em relação às questões ecológicas e ambientais. Como um dos materiais mais consumidos globalmente (SCHNEIDER et al., 2011), é crucial torná-lo menos prejudicial ao meio ambiente.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Breve histórico sobre o surgimento do concreto

O concreto é um material de construção fundamental que remonta a muitos séculos atrás. Suas origens são atribuídas aos antigos romanos, que desenvolveram uma mistura de calcário, areia, água e cinzas vulcânicas que se endureceria com o tempo, criando uma estrutura resistente e durável. Essa mistura, conhecida como "opus caementicium", também chamado de concreto romano. Foi utilizado na construção de diversos monumentos e estruturas, como o Panteão de Roma e o Coliseu. (LEVY et al. 2002)

**Figura 1 –História do concreto**

Concreto Antigo:	5000 a.C. – 100 a.C.;
Concreto Romano:	100 a.C. – 400 d.C.;
Concreto Medieval:	1200 d.C. – 1600 d.C.;
Concreto da Revolução Industrial:	1600 d.C. – 1800 d.C.
Concreto Moderno:	1800 d.C em diante
Concreto com Agregados Reciclados	1946 d.C.
Concreto de Alto Desempenho	1990 d.C.

Fonte: Adaptado de Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção. (LEVY; HELENE, 2002, p. 1)

O concreto antigo, datado de 5.600 a.C encontrado em um piso de uma casa, na Iugoslávia, era constituído de cal, argila e agregados. As pirâmides egípcias, já em 2500 a.C também foram parcialmente construídas com concreto. Em 75 a.C., o chamado de concreto romano, sendo os primeiros a desenvolver uma mistura cimentícia eficaz, tiveram grandes aplicações e desenvolvimento em grande escala, incorporado em obras de grande porte como o Anfiteatro, de Pompeia, o Coliseu, na Roma, construído em 80 a.C, o Panteão, também localizado em Roma, em 127 d.C.,

logo o concreto passou a ser utilizado em diversas estruturas, como redes de abastecimento de água, esgoto e sistemas de drenagens. (LEVY; HELENE, 2002)

Já na Idade Média, com a queda do império romano, o uso do concreto diminuiu, com maior foco na construção de estruturas em pedra e madeira. Somente no século XVIII que o interesse pelo concreto ressurgiu, com o desenvolvimento de cimentos mais avançados na Europa. Outra inovação fundamental, no período, foi a adição de barras de aço ao concreto, criando o concreto armado. Essa técnica, desenvolvida no final do século XIX, aumentou significativamente a resistência e a versatilidade do material. (LEVY; HELENE, 2002)

No século XX, o concreto se consolidou como um dos principais materiais de construção, com avanços contínuos em sua composição, aplicações e técnicas de produção.

Como menciona Kofi Annan, ex-secretário geral da ONU (2004), “O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo depois da água”.

Ao longo dos séculos, a tecnologia do concreto foi aprimorada, com a adição de outros componentes e a evolução dos processos de mistura e aplicação. Hoje em dia, o concreto é amplamente utilizado na construção civil em todo o mundo, sendo um material essencial para a construção de edifícios, pontes, estradas e outras estruturas fundamentais para o desenvolvimento urbano e infraestrutura. (HUGO et al., 2023)

## **2.2. Primeiros estudos envolvendo concreto**

John Smeaton (1756) deu um grande passo na utilização do cimento, baseando-se na mistura por meio da calcinação e calcários argilosos, obtendo grandes avanços e na utilização do material, em estruturas que solicitavam altos desempenhos, como o farol de Eddystone tornando-se um marco na construção civil. (SKEMPTON, 1991)

Já o cimento Portland, como conhecemos hoje, tem seu surgimento com os estudos do químico Joseph Aspdin (1824), registrando outro marco importante na era da construção civil, e novos desenvolvimentos do cimento como material constituinte do concreto na construção. (CARDWELL, 2001)

As técnicas de dosagem antigas eram principalmente empíricas e baseadas no conhecimento tradicional sobre as proporções de argamassa, frequentemente se tornando econômicas. (HELENE; TERZIAN, 1992).

Com tudo, devemos salientar as fases que antecedem as ações tomadas nas dosagens de concreto, considerando as definições realizadas pelo engenheiro responsável pelo projeto estrutural, tais como: as propriedades do concreto no seu estado fresco, geralmente definidas com base nas taxas de aço das estruturas, dimensões das estruturas, também, a execução do lançamento, e o transporte (distância) do concreto pelo caminhão betoneira. A dosagem do concreto envolve a escolha dos materiais constitutivos, incluindo cimento, agregados, água e possivelmente aditivos químicos e adições minerais, visando obter a melhor composição. (PETRUCCI, 1982)

Os métodos de dosagem de concreto têm evoluído desde o início do século XX, com contribuições e parâmetros estudados de grande importância com pesquisadores, resultados que desempenham papéis importantes nos métodos atuais disponíveis na atualidade. (HELENE; TERZIAN, 1993), dos estudos podemos destacar aqueles que levam bases até os métodos disponíveis hoje:

### **2.2.1. Lei de Lyse (1932)**

A Lei de Lyse é um princípio fundamental nas dosagens de concreto, especialmente relevante para a obtenção de misturas otimizadas e eficientes. Esta lei aborda o empacotamento de partículas, um aspecto crucial para determinar a densidade e a porosidade do concreto.

Segundo a Lei de Lyse (Equação 1), a distribuição granulométrica dos agregados deve ser tal que a quantidade de vazios entre as partículas seja minimizada, resultando em um concreto mais denso e resistente. A fórmula básica associada à Lei de Lyse é utilizada para calcular a proporção ideal de agregados finos e grossos, garantindo que a mistura tenha a menor quantidade possível de espaços vazios. Isso não só melhora a resistência mecânica do concreto, mas também reduz a quantidade de pasta de cimento necessária, o que pode resultar em economias significativas de custos e uma menor pegada ambiental. A fórmula da Lei de Lyse para o empacotamento de partículas é comumente expressa como:

#### **Equação 1 – Lei de Lyse**

$$m = k_3 + k_4 \times a/c \quad (01)$$

Onde os fatores “k” são constantes e dependem do tipo de material utilizado.

### 2.2.2. Lei de Molinari ou Lei de Prizskulnik e Kirilos (1974)

A Lei de Molinari (Equação 2) é uma teoria avançada no campo da engenharia civil que se concentra em otimizar a resistência e durabilidade do concreto armado. Estudada por Giovanni Molinari, a lei aborda a interação entre as partículas de cimento, agregados e a água, propondo uma distribuição otimizada para maximizar a compactação e minimizar os vazios:

#### Equação 2 – Lei de Molinari

$$c = \frac{1000}{k_5 + k_6 x M} \quad (02)$$

Trata-se de uma abordagem teórica para estimar a resistência do concreto com base no tipo de cimento, e relação água/cimento.

Assim como citam Helene e Tutikian (2011) em “Dosagem dos Concretos de Cimento Portland”, aborda a importância da resistência à compressão do concreto: “O consumo de cimento por m<sup>3</sup> de concreto varia na proporção Inversa da relação em massa seca de agregados/cimento (m).” (HELENE; TUTIKIAN, 2011)

Este é um fator crítico, pois determina em grande parte a capacidade de uma estrutura de concreto armado para suportar cargas sem falhar ou deformar-se excessivamente. A resistência à compressão do concreto pode ser melhorada através de várias técnicas, incluindo o uso de concreto de alta resistência, a adição de fibras de reforço ou a aplicação de técnicas de cura adequadas, segundo ele.

Este parâmetro é amplamente utilizado pelo método de dosagem IPT-EPUSP. (PETRUCCI, 1982)

A aplicação prática da Lei de Molinari tem levado a avanços significativos na formulação de concretos de alta performance, permitindo o desenvolvimento de infraestruturas mais seguras e duráveis. A compreensão e aplicação dessa lei são essenciais para engenheiros que buscam otimizar suas misturas de concreto.

### 2.2.3. Feret (1892)

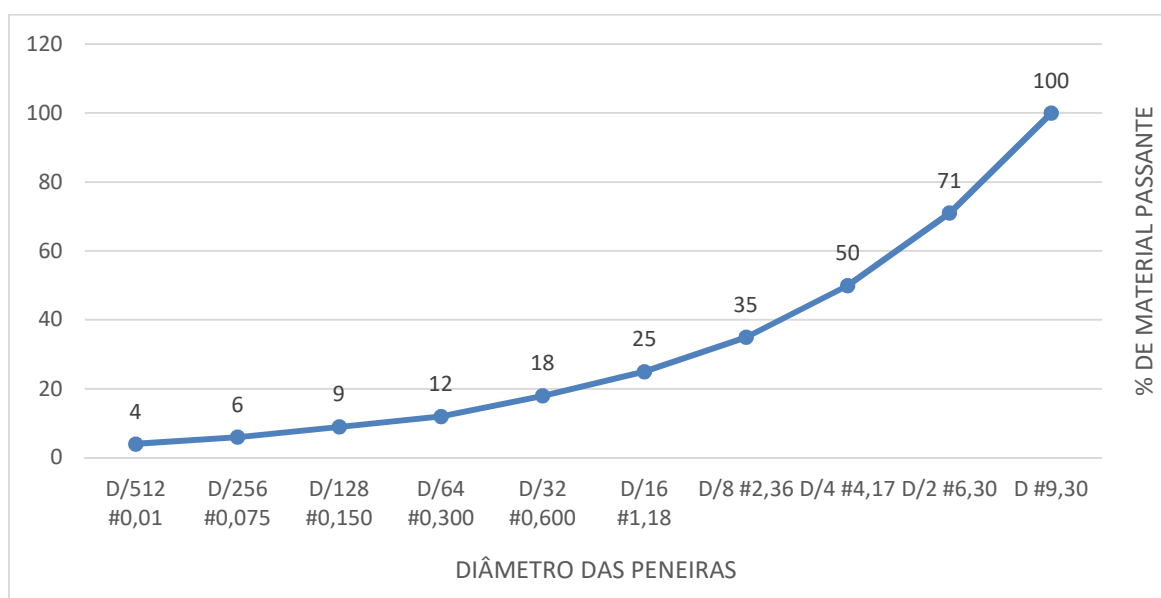
Os trabalhos realizados pelo francês René Feret, foram realizados ao fim do século XIX, tendo impactos nos aspectos que temos hoje em relação a trabalhabilidade, escolha dos materiais, porosidade e coesão, trabalhos que foram

destinados aos estudos em argamassas, com incorporações que fazem relação ao concreto. (DE LARRARD; SEDRAN, 2002b)

#### 2.2.4. Fuller e Thompson (1907).

Os engenheiros W.B Fuller e Sanford E. Thompson foram responsáveis por diversos estudos nos quais parâmetros são considerados até os dias atuais, como a curva granulométrica (Imagem 2) de Fuller e Thompson (A Method for Proportioning Concrete Mixture, 1907) ideal para os agregados com a trabalhabilidade do concreto, diâmetro máximo dos agregados e otimização dos índices de vazios da mistura. (W. B, FULLER; E. THOMPSON, 1907)

**Tabela 1 - Curva de Fuller e Thompson**



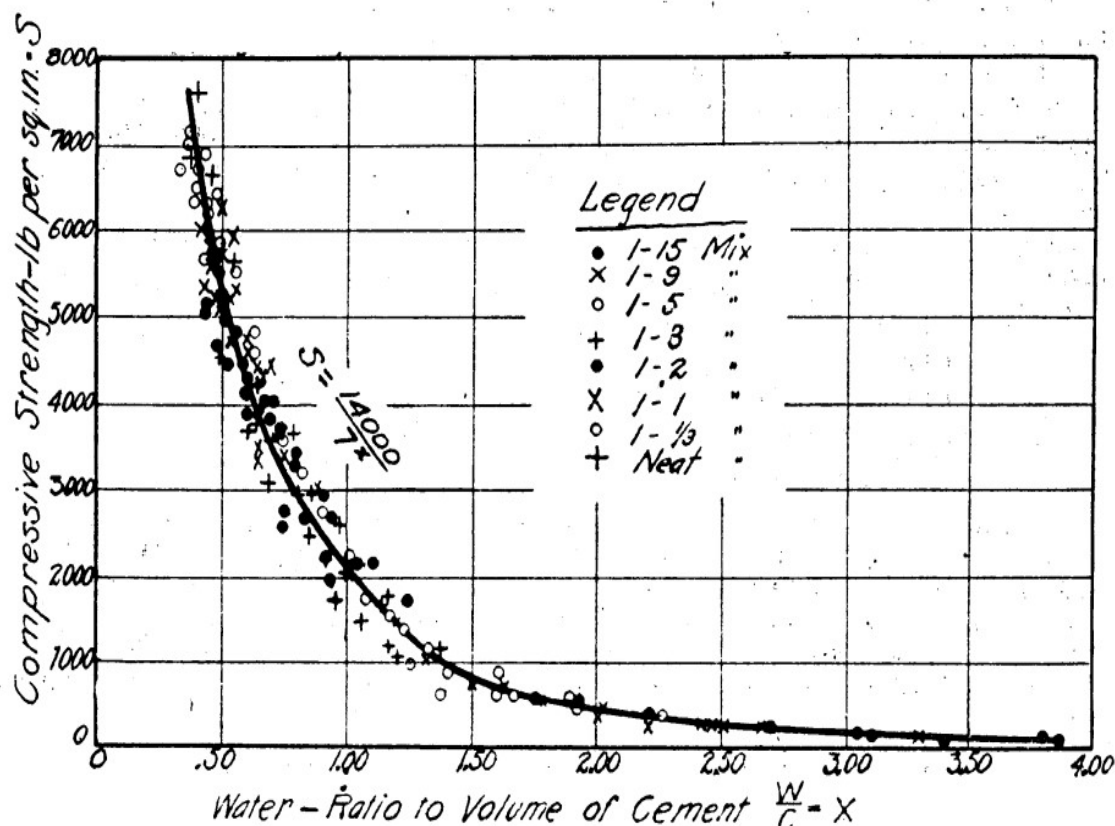
Fonte: Adaptado de The Laws of Proportioning Concrete (1907 p. 64)

#### 2.2.5. Duff Abrams (1918)

Duff, estabelece e diz que a relação entre água e cimento, que chamamos abreviadamente de relação a/c (Figura 3), que utilizamos até os dias atuais, suas pesquisas e desenvolvimentos contribuíram significativamente para a compreensão que temos hoje das propriedades do concreto.

Além disso com o trabalho de Duff em “Design of Concrete Mixture” (1919), ele também preconiza o módulo de finura dos agregados e o abatimento do concreto, utilizado para medir a consistência e trabalhabilidade do concreto, que foram baseados em mais de 50.000,00 ensaios realizados em Chicago, entre 1914 a 1918. (DEWAR, 2003)

Figura 2 – Curva da relação a/c de Abrams



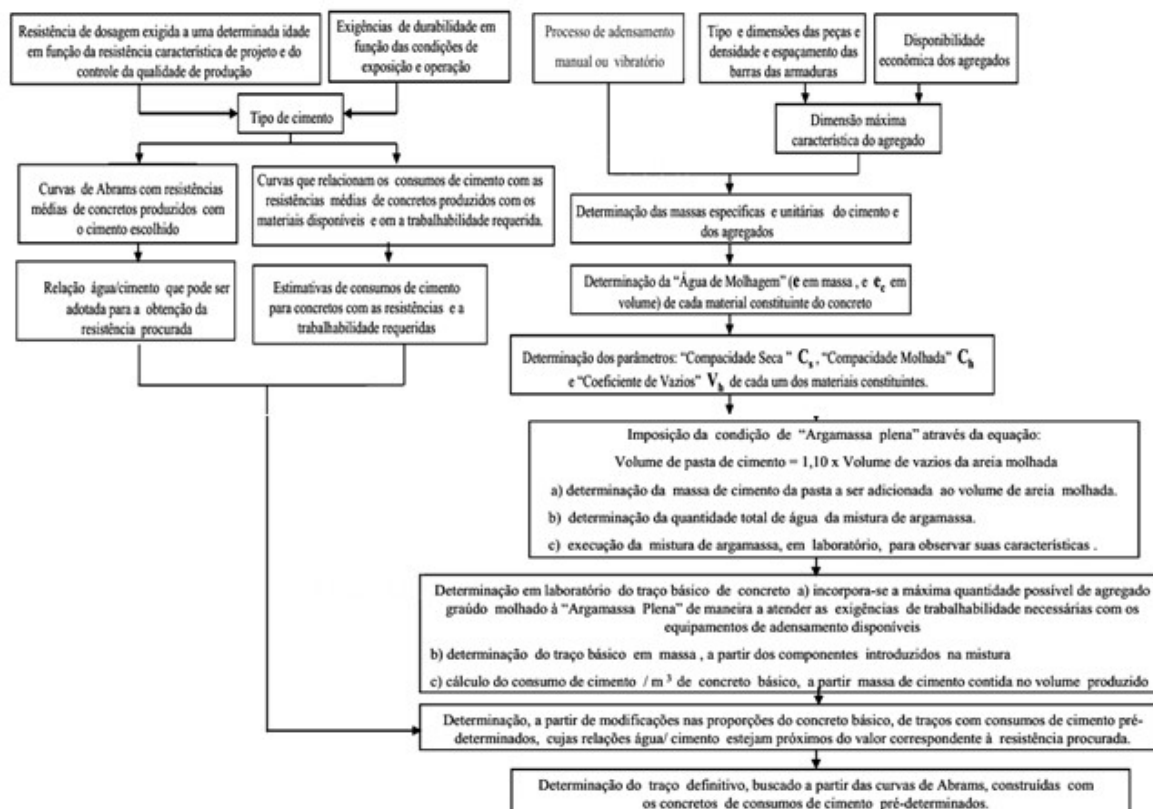
Fonte: Adaptado de Design of Concrete Mixtures, 1919.

### 2.2.6. Roger Vallette (1949)

Roger Vallette, engenheiro francês, propôs em seus estudos, um fluxograma simplificado, o método de dosagem de concreto SNCF ou, Societe Nationales dês Chemin de Fer Français (1948) para dosagem de concretos com base nas características da aplicação do respectivo concreto.

Contrariando os modelos de Fuller e Thompson (1907), Roger propôs o princípio da granulometria descontínua dos agregados (HELENE; TUTIKIAN, 2011), visando concretos com baixos teores de argamassa e consumos reduzidos de cimento para o seu período, porém com uma complexidade elevada, considerando valores do cobrimento mínimo da argamassa, volume de vazios e relação água / cimento.

**Figura 3 – Dosagem SNCF**



Fonte: Fluxograma simplificado do método de dosagem SNCF, por Roger Vallette, 1949

### 2.2.7. Curva de Faury (1999)

O pesquisador Faury, teve seus estudos concentrados em aspectos como a granulometria dos agregados, a consistência do concreto e a influência de diferentes adições na resistência e durabilidade do material. Ele considera a granulometria dos agregados, a consistência desejada e as propriedades do cimento para determinar a quantidade ideal de cada componente na mistura. O método é conhecido por sua simplicidade e precisão.

A Pesquisa de Faury teve um impacto significativo na indústria da construção civil, contribuindo para a produção de concreto de alta qualidade e desempenho. Seus estudos ajudaram a otimizar a utilização de materiais, reduzir custos e aumentar a durabilidade das estruturas de concreto. Além disso, suas contribuições para o desenvolvimento de métodos de análise do concreto permitiram um melhor controle de qualidade e segurança nas obras.

### **2.2.8. Jules Bolomey (1925)**

Bolomey foi um engenheiro e pesquisador suíço, que teve grande participação nos estudos das dosagens de concreto e nas composições ideais com os materiais constituintes do concreto.

Bolomey teve seus estudos concentrados no que ele chamou de dosagem racional de concreto, levando a otimização da granulometria dos materiais e a relação a/c. A influência da granulometria dos agregados de Bolomey enfatizou a importância da distribuição granulométrica adequada dos agregados (miúdos e graúdos) na composição do concreto. Suas propostas sobre a curva granulométrica ideal, semelhantes às de Fuller, visavam obter uma mistura mais compacta e com melhores propriedades. (DEWAR; ANDERSON, 2003)

### **2.3. Empacotamento das partículas dos agregados**

Os estudos sobre o empacotamento de partículas têm sido essenciais para o avanço da tecnologia do concreto. As contribuições de pesquisadores como Fuller, Thompson, citados anteriormente proporcionaram uma compreensão mais profunda da importância da distribuição granulométrica e da densidade das partículas na dosagem de concreto. (CASTRO; FERREIRA, 2016)

Também, as pesquisas de Andreasen, Powers e o modelo de Furnas tiveram grandes contribuições para o que conhecemos hoje no campo das dosagens de concretos de alto desempenho. Esses conhecimentos continuam a ser aplicados e refinados, resultando em concretos mais duráveis, resistentes e eficientes. O empacotamento de partículas é um conceito fundamental nos estudos de dosagem de concreto. Ele se refere à maneira como as partículas de diferentes tamanhos se organizam para preencher o espaço de forma eficiente, resultando em uma mistura de concreto mais densa e resistente.

Esse conceito tem sido amplamente estudado por diversos pesquisadores ao longo dos anos, contribuindo significativamente para a melhoria das propriedades do concreto. A importância do empacotamento de partículas vai além da simples organização das partículas; envolve também a otimização da mistura para maximizar a resistência e durabilidade do concreto, minimizando a quantidade de vazios e aumentando a coesão interna. Além disso, o empacotamento eficiente das partículas pode levar a uma economia significativa de material, pois permite o uso mais eficaz dos agregados disponíveis. (DE OLIVEIRA et al., 2000)

A pesquisa contínua nesse campo promete trazer ainda mais inovações, permitindo a criação de concretos que atendam às demandas crescentes de sustentabilidade e eficiência na construção civil. A compreensão e aplicação adequada do empacotamento de partículas são fundamentais para enfrentar os desafios futuros na engenharia de concreto, garantindo a construção de estruturas seguras, duráveis e economicamente viáveis. (OLIVEIRA et al., 2018)

### **2.3.1. Andreasen e Andersen**

No ano de 1930, Andreasen e Andersen propuseram uma fórmula (3) para a distribuição granulométrica ideal, que é amplamente utilizada até hoje. A fórmula de Andreasen-Andersen considera a proporção entre as partículas finas e grossas, permitindo ajustar a mistura para alcançar o empacotamento ideal. Essa fórmula é extremamente versátil e pode ser adaptada para diferentes tipos de agregados e condições de mistura, tornando-a uma ferramenta essencial para engenheiros e pesquisadores na busca por concretos de alta performance. (SNELLINGS; MERTENS; ELSEN, 2012)

#### **Equação 3 – Modelo de Andreasen e Andersen**

$$CPFT = \left( \frac{d}{D_{m\acute{a}x}} \right)^q \times 100 \quad (03)$$

Esse modelo é amplamente utilizado na formulação de concretos, onde CPFT, sendo a fração acumulada de partículas com diâmetro menor ou igual a  $d$ , e  $D_{m\acute{a}x}$  é o diâmetro máximo das partículas. O parâmetro “ $q$ ” é um número adimensional que determina a forma da distribuição granulométrica. Quanto maior o seu valor mais estreito será a distribuição, ou seja, haverá menos variação no tamanho das partículas.

### **2.3.2. Powers**

No final dos anos 1958, Powers introduziu o conceito de "fator de empacotamento", que quantifica a eficiência do empacotamento de partículas em uma mistura de concreto. (POWERS, 1968) Esse fator ajuda a avaliar a densidade e a trabalhabilidade do concreto, permitindo ajustes na dosagem para melhorar suas propriedades. O trabalho de Powers foi revolucionário, pois forneceu uma métrica

quantificável para a eficiência do empacotamento, permitindo uma abordagem mais científica e precisa na dosagem de concretos.

Segundo ele, o empacotamento de partículas é fundamental para a fabricação de concretos de alta resistência e durabilidade. Ao otimizar a distribuição granulométrica dos agregados, é possível reduzir a quantidade de pasta de cimento necessária, o que diminui a porosidade e aumenta a resistência do concreto.

Além disso, o empacotamento eficiente melhora a trabalhabilidade e a coesão da mistura, facilitando a colocação e o acabamento do concreto. Em aplicações práticas, isso se traduz na capacidade de criar estruturas mais robustas e duráveis, com menor necessidade de manutenção e reparos ao longo do tempo. O empacotamento adequado também permite a criação de concretos especiais, como os auto-adensáveis e de alta performance, que são essenciais em projetos de engenharia complexos e exigentes. (POWERS, 1958)

#### **2.4. Contextualizando os métodos difundidos atualmente**

A dosagem do concreto é uma etapa crucial em qualquer projeto de construção, e existem diversos métodos disponíveis para essa tarefa. A escolha de qual método usar não é uma decisão que deve ser tomada de ânimo leve. Em vez disso, é uma decisão que pode depender de um amplo conjunto de fatores, variando desde a natureza específica da obra que está sendo realizada, até o tipo de concreto que está sendo utilizado, além das condições ambientais existentes no local onde a obra está sendo executada.

Cada um desses fatores pode desempenhar um papel importante na determinação de qual método de dosagem será o mais eficaz. Por exemplo, certos tipos de concreto podem reagir de maneira diferente a diferentes métodos de dosagem, tornando um método mais apropriado do que outro. Da mesma forma, condições ambientais específicas, como temperatura e umidade, também podem afetar a eficácia de um método de dosagem em particular.

Os métodos mais comumente utilizados para dosagem de concreto são o Método ACI, Método ABCP, Método IPT/EPUSP e o Método do Ibracon. Cada um desses métodos tem suas próprias particularidades, e podem ser mais adequados para diferentes situações e contextos. É importante que os engenheiros e outros profissionais envolvidos na construção estejam bem informados sobre cada um

desses métodos para tomar a decisão mais adequada para suas necessidades específicas. A disponibilidade dos materiais, podem ser um diferencial na escolha do método.

Atualmente, os métodos de dosagem de concreto no Brasil são o resultado de décadas de pesquisas, adaptações e inovações realizadas por instituições de ensino, centros de pesquisa e profissionais da construção civil, visando atender às necessidades e características específicas da indústria da construção no país.

No Brasil, não existe um texto consensual de determinação do estudo de dosagem. Essa ausência de regulamentação e normalização nacional específica para a dosagem do concreto torna possível a existência de vários métodos de dosagens com diferentes procedimentos e parâmetros. Tais métodos normalmente são desenvolvidos por institutos de pesquisas nacionais ou por adaptação de normas estrangeiras (RICCI; PEREIRA; AKASAKI, 2017).

No presente trabalho, os métodos relatados, contribuem com diversos fatores históricos para o que conhecemos hoje sobre o concreto no Brasil, dentre eles, podemos ressaltar alguns de forma específica:

#### **2.4.1. Método ACI**

Método americano (1985), projetado pelo Instituto Americano de Concreto (Michigan, USA), método caracterizado por ser realizado em etapas, retornando com os volumes dos materiais necessários para 1,0m<sup>3</sup> de concreto, porém é necessário ter conhecimento prévio dos agregados, e conhecimentos preliminares anteriores como a resistência desejada aos 28 dias de idade do concreto; quantias mínimas de cimento e aglomerante, com base na relação água/cimento (ABRAMS, 1909), relação água/cimento máxima permitida; diâmetro máximo dos agregados graúdos; definição da faixa de abatimento necessária e a porcentagem de ar incorporado máxima, esses são os parâmetros iniciais necessários início nos procedimentos.

Além destes parâmetros, são necessários a caracterização dos agregados, como massas específicas dos agregados, densidades, módulo de finura e umidades. (FIAZ, 2023). Conhecendo os materiais, o método busca uma caracterização em etapas, facilitando o desenvolvimento e a obtenção do traço de concreto para a concepção inicial:

- Escolha do abatimento (mm);

- Escolha da dimensão máxima do agregado; gráúdo (mm).
- Seleção do teor de ar incorporado máximo (%).
- Escolha da resistência estimada a compressão; FCJ (MPa).
- Relação água/cimento (fator A/C);
- Quantia de cimento inicial (kg)
- Quantidade de agregado gráúdo (kg)
- Quantidade de agregado miúdo (kg).
- Umidade do agregado (%).

O método faz o uso de tabelas e “Required” (requisitos) para facilitar a escolha dos parâmetros necessários e mais comumente utilizados, como abatimento (polegadas) de acordo com o tipo de estrutura, dimensões máximas dos agregados gráúdos, também, com base no tipo de estrutura de projeto, quantia de água com base nos estudos anteriores realizados, de acordo com a exposição ao meio ambiente (Mild, Moderate, Severe Exposure), para a resistência média (FCJ) faz-se a utilização de duas fórmulas tendo como base o fator de valores tabelados (Compressive Strenght) de acordo com o ar incorporado ar e valores estabelecidos pela fórmula, sendo o maior valor levado em conta entre a razão das duas fórmulas e a relação água/cimento (A/C) que é diretamente relacionada com a resistência a compressão, é definida pela classe de agressividade em que o concreto será submetido, que consiste em uma tabela relacionando a exposição do concreto após a cura e o cobrimento de aço da estrutura.

- Cálculo da quantia de cimento: definida pela razão entre resistência média (FC) / (fórmula pela relação água cimento definida previamente pelos termos do ambiente).
- Estimativa do agregado gráúdo (VB): definido com a utilização de uma tabela, relacionando o diâmetro do agregado definido, com “Fineness Modulus” do agregado miúdo, resultado dos ensaios realizados na caracterização do agregado.

“The most economical concreto will have as much as possible  
space occupied by CA”  
(FIAZ, 2023,p. 15).

- Estimativa do agregado miúdo (VA): = 1000 - VC - VB - VV - Água.

Após essas determinações, o cálculo de massa (peso) de cada um dos materiais é dado pelo produto do volume pela sua massa específica, caracterizada anteriormente pelos ensaios de caracterização.

#### **2.4.2. IPT-EPUSP**

Originalmente este método que é descrito no Manual de Dosagem e Controle de Concreto (HELENE; TERZIAN, 1993) é uma adaptação do método desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) em São Paulo, pelo professor e engenheiro Eládio Petrucci que preconizou originalmente os estudos relacionados as dosagens do IPT (PETRUCCI, 1982), caracterizado segundo ele como um método de dosagem amplo, totalmente experimental, eficiente e simples (CAMPITELI, 2004).

Segundo eles (HELENE; TERZIAN, 1993) este método, tem como objetivo o uso gradual e proveito dos materiais disponíveis, seja quaisquer características que tenham, como módulo de finura, e curva granulométrica.

O método de dosagem IPT/EPUSP inicialmente estabelece definindo três classes de resistência característica ( $f_{ck}$ ) aos 28 dias de idade, diâmetros máximos dos agregados e o abatimento previsto do concreto em  $80 \pm 20$  mm que por sua vez é fixado e ajustam-se os teores de argamassa e relações água cimento de acordo com o necessário.

Segundo Petrucci (IPT), o traço com menor consumo de água para o abatimento esperado tem então, a melhor proporção dos agregados (PETRUCCI, 1982). O método IPT/EPUSP segundo Helene e Terzian tem correlações feitas a partir das leis de comportamento expressar descritas por Duff Abrams (Lei de ABRAMS, 1918), Lyse (Lei de LYSE, 1932), e Tullio Molinari (Lei de MOLINARI, 1940), além dos parâmetros fundamentais como teor de argamassa seca, relação de agregados secos, e consumo de cimento.

A definição das quantidades, pelo método IPT/EPUSP dispõem três tipos de traços padrões, como mencionado anteriormente, em traço rico com valores unitários totais de agregados em relação ao cimento relação de 3,5, segundo como traço médio com a relação de 5,00 e o traço pobre com relação de 6,50. Com as respectivas resistências, adota-se um desvio padrão com a condição de preparo. (NBR 12655:2022)

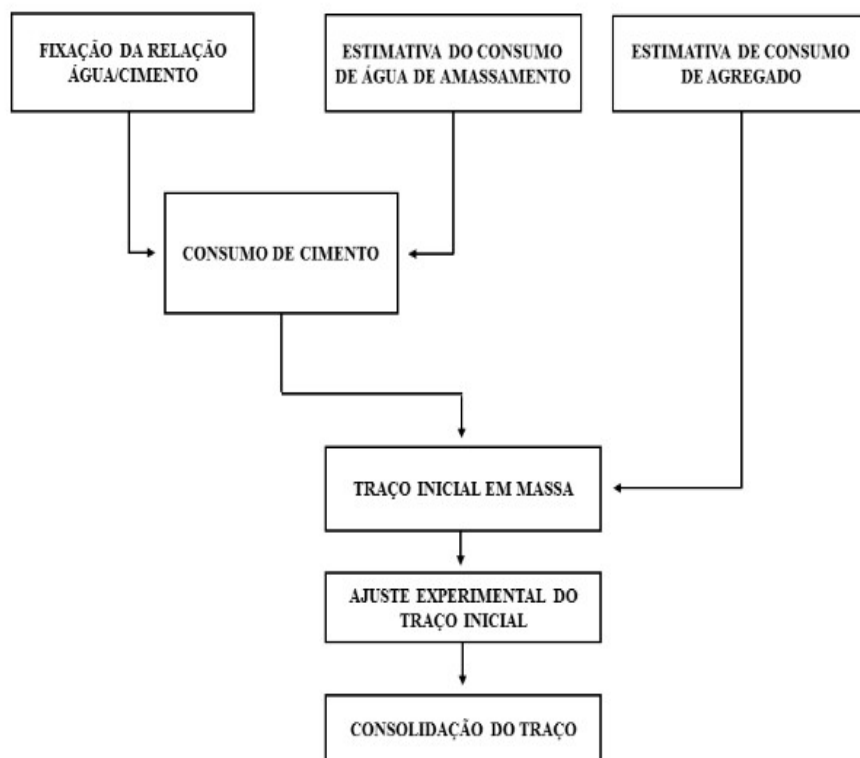
Segundo Helene e Terzian, pode-se obter pela equação do teor de argamassa, arbitrando um valor desejado para o teor de argamassa, a quantia de agregado miúdo, e posteriormente pela mesma fórmula da proporção pode-se obter a quantia do agregado graúdo, o valor da relação água/cimento também é definido pela escolha inicial, utilizando como base as relações padronizadas. (HELENE; TERZIAN, 1993)

### **2.4.3. Método da ABCP**

O método descrito pela Associação Brasileira de Cimento Portland (1960) tem base similares ao método ACI (ACI, 1985), inicialmente publicado em 1984, pelo engenheiro Públio Penna Firme Rodrigues (RODRIGUES, 1983) com algumas adaptações para compor a formulação de acordo com os agregados presentes no Brasil, que atendem aos requisitos da NBR 7211:2022 – Agregados para concreto, presente no estudo intitulado de “Parâmetros de Dosagem Racional do Concreto” (1983) e assim como todos os métodos, ele resulta em uma concepção inicial de mistura, sendo necessária a realização da mistura experimental em laboratório.

Segundo Boggio, a partir das etapas (fluxograma 1) prescritas pelo método, devemos estimar a condição inicial da resistência a compressão em função do desvio padrão (sd), e fixar uma relação água/cimento de acordo com a NBR 6118:2023, e que classifica as classes de agressividade de exposição do concreto e NBR 7211:2009 que delimita e classifica os limites propostos por ela, que será prevalecente nas curvas de dosagem. De acordo com Rodrigues (1998) a quantia de água na mistura necessária para atingir um determinado abatimento, é resultado da granulometria dos agregados totais e suas características. (BOGGIO; ALEGRE, 2000)

## Fluxograma 1 – Parâmetros de Dosagem Racional do Concreto



Fonte: Adaptado de parâmetros de dosagem racional do concreto, 1983.

Segundo Rodrigues (RODRIGUES, 1983) em “Parâmetros de dosagem racional do concreto”: “Este método de dosagem foi desenvolvido de maneira a fornecer para misturas plásticas, o mais baixo teor de areia”

O método então, estima uma quantidade de água inicial na mistura fazendo uma relação entre o abatimento previsto, e o diâmetro máximo do agregado graúdo.

**Tabela 2 – Consumo de Água ABCP**

Abatimento (mm)	Dimensão máxima do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Adaptado de PARAMETROS DA DOSAGEM RACIONAL DO CONCRETO, 1983 (Curso de Parâmetros de Dosagem de concreto, ABCP, 2023 p. 21)

**Tabela 3 – Volume Compactado Seco ABCP**

MF	Dimensão máxima do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,82	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,708
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Adaptado de parâmetros da dosagem racional do concreto, 1983 (Curso de Parâmetros de Dosagem de concreto, ABCP, 2023 p. 23)

Com a estimativa do consumo de água, e o valor da relação a/c, é possível fazer uma relação inversa e obter a quantia de cimento por m<sup>3</sup> estimado, assim, partindo para a estimativa do consumo dos agregados. Outro fator importante do método, é a obtenção pré suposta do menor índice de vazios na mistura, que é determinado pelo maior consumo possível de agregado seco por metro cúbico, partindo de uma relação ótima entre agregado graúdo e agregado miúdo, de valores experimentais propostos pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), valores tabelados pela relação entre o módulo de finura do agregado miúdo e a dimensão máxima do agregado graúdo.

Com isso, e obtendo o consumo em massa de agregado graúdo na mistura, faz-se a conversão para volume, e assim, com um somatório da conversão das massas de cimento, água e agregado graúdo, pelas suas massas específicas, obtemos o volume de agregado miúdo, posteriormente convertido para massa pela sua massa específica dentro da mistura. A apresentação do traço é dada pelo TUP (traço unitário em peso seco) com relação ao unitário do cimento.

#### **2.4.4. Método Ibracon**

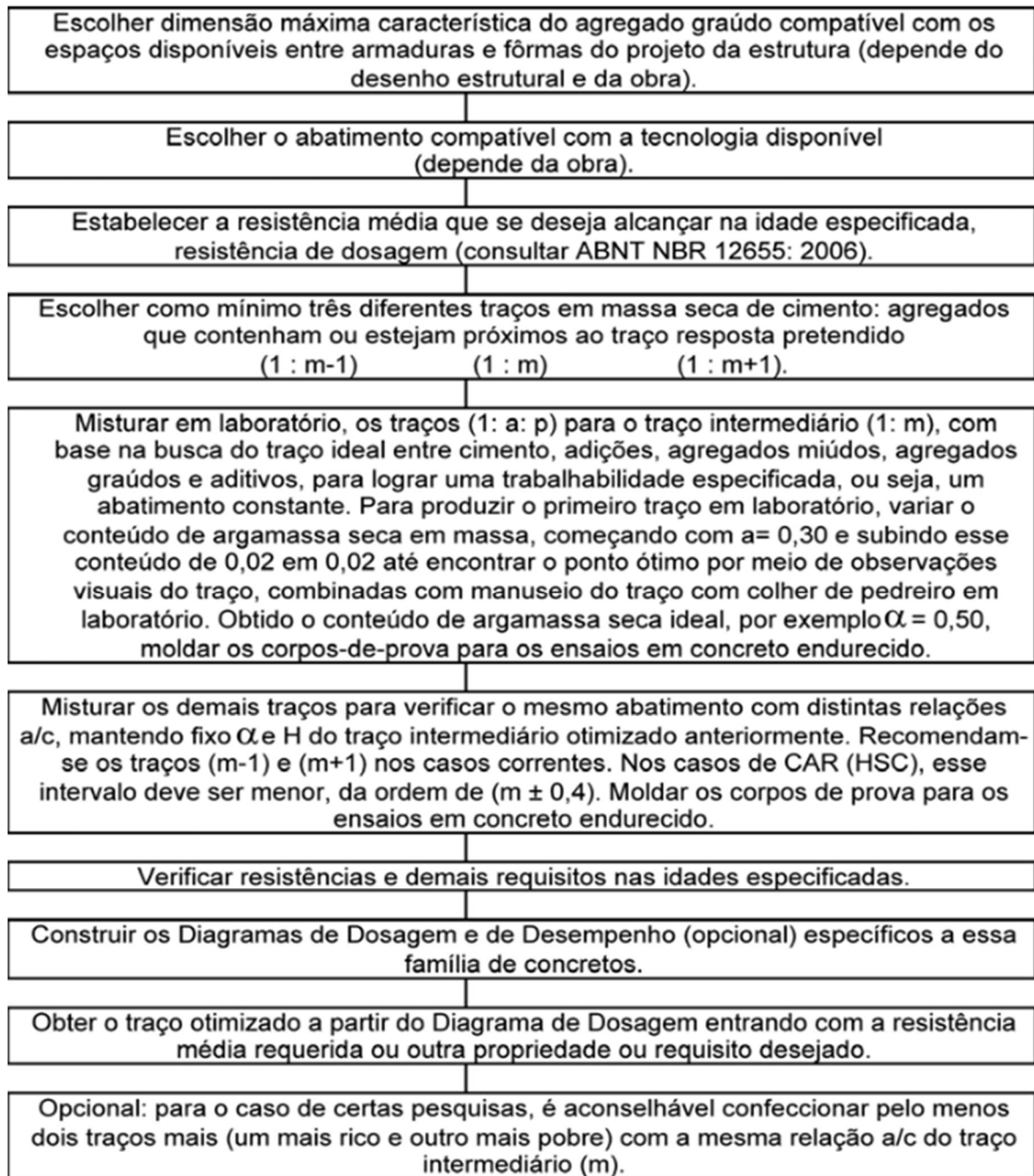
Não diferente dos outros métodos, como mencionado anteriormente, o método do Ibracon, teve participações dos pesquisadores do IPT, Priszkulnik, Kirilos, Terzian e Tango, para o método que conhecemos hoje, se tornando um dos mais

utilizados no Brasil, pela sua versatilidade e simplicidade, capaz de oferecer dosagens racionais, que atendem as exigências técnicas como as normas regentes no Brasil, tornando-o um dos métodos mais procurados no país. (HELENE; TERZIAN, 1993)

Classificado como um método teórico experimental, pois, inicialmente avalia o comportamento do concreto de forma analítica, e com a parte experimental feita em laboratório, avalia-se as condições necessárias para se obter a reologia e trabalhabilidade requerida, assim como, quantia de água de amassamento e teores de argamassa seca diferentes. (HELENE; TUTIKIAN, 2011)

Inicialmente, é necessário ter conhecimento das equações que o método propõem como o teor de argamassa seca ( $\alpha = (1+a)/(1+m)$ ), a relação de água com os materiais secos ( $H = (a/c)/(1+m)$ ), e o consumo de cimento ( $C = \gamma/(1+a+p+a/c)$ ), entendendo o seu comportamento, o método recomenda a caracterização dos materiais que serão incorporados nas curvas de dosagem, de acordo com a disponibilidade dos mesmos na região, assim como a dimensão máxima dos agregados, classificação do tipo de cimento Portland e aditivos. Com isso, traz um diagrama simplificado para as etapas na concepção das curvas de dosagens, apresentado abaixo:

## Fluxograma 2 – Método Ibracon



Fonte: Adaptado de diagrama de fluxo do método de dosagem IBRACON (2011).

O diagrama apresenta resultados que são aproximados por equações, as quais são denominadas leis clássicas do concreto. No primeiro quadrante da figura, os resultados seguem a lei de Abrams (1998) ou a lei de Powers (1966). Já no segundo quadrante, os ajustes são feitos de acordo com a lei de Lyse (1932). Por fim, no terceiro quadrante, a lei utilizada é a de Priszulnik e Kirilos (1974).

## **2.5. Semelhanças de abordagens entre os métodos**

Com base nos métodos mencionados anteriormente, podemos identificar as peculiaridades e traços em comum de cada método, a fim de alcançar um concreto com as propriedades físicas e mecânicas desejadas para uma aplicação específica. Com tudo, todos eles atribuem fatores como resistência, trabalhabilidade e durabilidade nos parâmetros iniciais de dosagem, buscando equilibrar uma mistura otimizada e regular.

Em síntese, os métodos de dosagem de concreto, apresentam suas particularidades, e ao analisa-los individualmente podemos verificar características em comum que refletem a importância de uma abordagem sistemática e fundamentada na ciência e na engenharia, das quais podemos destacar entre eles:

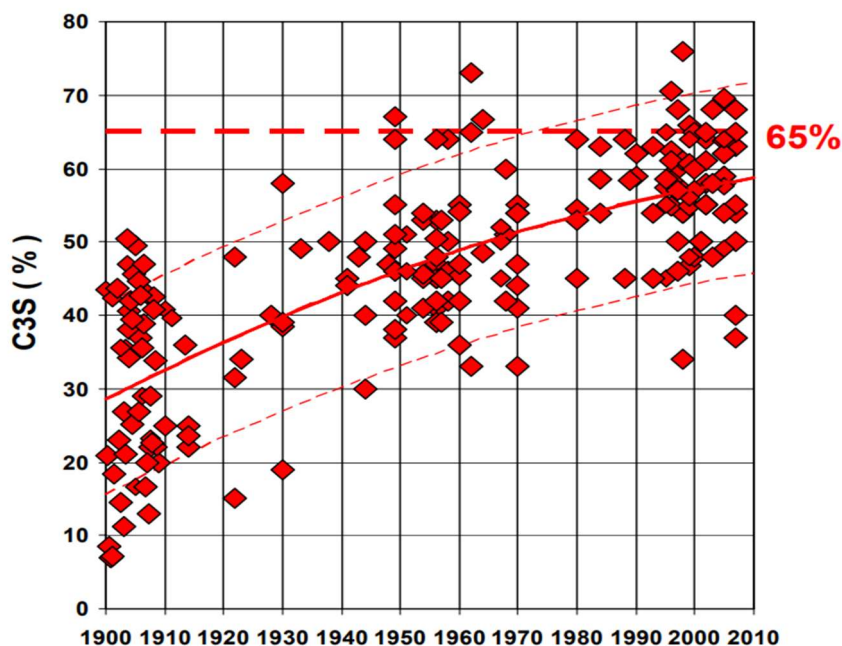
- Objetivo comum: determinar a composição ideal dos materiais constituintes (cimento, agregados, água e aditivos).
- Abordagem sistemática: os métodos de dosagem seguem uma abordagem sistemática, envolvendo etapas bem definidas de caracterização dos materiais, definição de parâmetros de dosagem, cálculos e ajustes da mistura.
- Utilização de dados experimentais: todos os métodos se baseiam em extensa pesquisa experimental, envolvendo a realização de ensaios e testes com diferentes composições de concreto para estabelecer relações empíricas ou modelos matemáticos.
- Consideração de fatores influentes: os métodos consideram diversos fatores que influenciam as propriedades do concreto, como a granulometria e características dos agregados, a finura e o tipo de cimento, a relação água/cimento, a consistência e as condições ambientais.
- Necessidade de experimentação: mesmo com métodos bem estabelecidos, é essencial a realização de ensaios e ajustes específicos para cada caso, considerando as características locais dos materiais e as condições de produção.

## 2.6. Escolha e determinação dos agregados no concreto

### 2.6.1. Principais características

A escolha dos materiais que constituem o concreto é importante em qualquer método de cálculo, hoje, devido aos fatores climáticos, alterações de faixas de rochas de acordo com os anos, tipo de rochas e processos industriais desses materiais, porções dos leitos das extrações de areias naturais, como ambientes mais secos, e menos secos, também classificações dos tipos de cimento Portland disponíveis por regiões, suas composições que hoje apresentam mudanças físicas (mais finos) e químicas, altos teores de C3S e C3A, que resultam em concreto com alto calor de hidratação, e pega acentuado, isso tudo, resultado de um processo mais industrializado ao realizar a moagem do clínquer, resultando atualmente em grãos mais finos, em relação a meados de 1970, como mostra a o gráfico 1, abaixo. (Cimentos e Concretos, 2010)

Gráfico 1 – Composição dos cimentos



Fonte: Cimentos e Concretos (THOMAZ ABPE, 2010).

De acordo com a NBR 16697:2018, as adições de C3S na composição dos cimentos, é de 50% a 70%, em relação a 1970 que, tínhamos valores máximos em 50%. (NEVILLE, 2015)

### **2.6.1.1. Escolha do tipo e características dos cimentos**

Sabemos que, existem propriedades distintas nos tipos de cimentos Portland em geral, desde suas classificações, alterações nas composições que podem resultar em propriedades diferentes após passar pelo processo de hidratação na mistura. (CHRIST; TUTIKIAN; HELENE, 2022)

Os parâmetros de finura, características de tempo de pega sobre as propriedades de cada tipo de cimento e adição podem ser definidos previamente pelo ensaio da pasta de cimento, desenvolvido também pelo engenheiro francês Louis J. Vicat (1786) (MEHTA; MONTEIRO, 2014) que é também conhecido pelo ensaio de Vicat, em seu trabalho "Cal de construção, Concretos e Argamassas" (VICAT, et al. 1818), conhecido e padronizado no Brasil pela NBR 16607:2018 - Cimento Portland – Determinação dos Tempos de Pega, Vicat diz que é possível avaliar as propriedades dos cimentos e o comportamento dos tempos de pega a partir dos intervalos e equipamentos utilizados no ensaio. Nos ensaios preliminares as dosagens de concretos, avaliar e conhecer as propriedades do cimento a ser utilizado é essencial (MEHTA; MONTEIRO, 2014) pois a partir dos resultados, adições disponíveis e suas características, podemos definir parâmetros como as porcentagens das adições.

Além disso, o ensaio da determinação dos tempos de pega (NBR 16607 – Cimento Portland - Determinação dos Tempos de Pega) pode influenciar na dosagem inicial dos aditivos que serão incorporados no concreto, junto aos fatores climáticos de cada região que, aliado as adições já realizadas podem reduzir ainda mais a quantia de água na mistura. (NEVILLE, 2015)

O consumo de cimento, segundo Walker, em seu trabalho em "Aplicação da Teoria da Probabilidade ao Projeto de Concreto para Especificações de Resistência" (1944) (DEWAR; ANDERSON, 2003) é descrito por meio de uma equação que traz fatores que dependem do tipo de cimento, propriedades dos agregados e da relação água / cimento, a partir desta relação é possível determinar a quantia de cimento necessária para uma determinada resistência desejada.

Segundo Luiz de Brito Prado Vieira (2017, <https://www.mapadaobra.com.br/Inovacao/traço-de-concreto-a-importância-do-cimento>).

“Conhecer exatamente o montante de cimento a ser adicionado na mistura é importante porque a resistência dependerá da relação água/cimento, ou seja, quanto menos água e mais cimento, mais resistente será o concreto. ”

Não diferente do método idealizado e adotados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (RODRIGUES, 1983) que faz relação a uma determinada quantia de água padronizada a partir de quantias já disponibilizadas e fazendo relação pela curva de referência da relação água / cimento (ABRAMS, 1919). Entende-se que, a quantia de cimento em uma mistura depende da resistência desejada.

A relação A/C está diretamente relacionada a isso, pois, quanto menor a quantia de água e maior a quantia de cimento, menor será este fator, conseqüentemente, maior será a resistência alcançada. Entretanto a quantidade de cimento na mistura de concreto pode e deve ser definida com base em outros fatores importantes como a exposição ambiental, a trabalhabilidade desejada e a disponibilidade de materiais de acordo com a NBR 12655:2015.

“O consumo excessivo de cimento e água na produção de concreto pode ter impactos ambientais significativos, como a emissão de CO<sub>2</sub> e o aumento do consumo de recursos naturais. É importante encontrar o ponto de equilíbrio entre a quantidade de cimento e água, considerando os aspectos de desempenho, durabilidade e sustentabilidade.” (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018)

### **2.6.2. Água de amassamento**

Segundo Carneiro, a tratativa em relação a quantia de água na mistura deve ser tratada com maior cuidado possível, pois a partir dela que podemos ter reduções ou aumento significativos na resistência a compressão do concreto. (CARNEIRO, et al. 1943)

Esse fator é menos notado em concretos com baixos consumos de aglomerante, pois o índice de vazios na mistura é maior, tornando menos suscetível

a água para um determinado abatimento requerido e ao aplicar consumos maiores de água, uma reação como a exsudação é notável, pois os materiais sólidos não garantem a retenção de água, fazendo com que o material com menor massa específica (Água = 0,9982 g/cm<sup>3</sup>) se eleve, visto como uma sedimentação dos materiais (T.C. Powers, 1918).

E ao adicionar consumos maiores de cimento, o índice de vazios na mistura é reduzido, reduzindo consideravelmente a quantidade de água necessário para um abatimento requerido, com isso a redução de água nesses casos pode ocasionar redução no volume final da mistura e segregação dos materiais caso mantida, levando a novos ensaios e determinações com novos consumos.

"A camada de gel que se forma na superfície das partículas de cimento durante a hidratação age como uma barreira, dificultando a penetração da água nas partículas não hidratadas. No entanto, a água ainda consegue chegar a essas partículas através de pequenos canais e poros na camada de gel, permitindo a continuação da hidratação."  
(MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. 2014, p. 151)

A água é fundamental para a dispersão de substâncias, mas sua eficácia como dispersante é limitada. Ela ajuda a diminuir a resistência entre as partículas, facilitando a dispersão, mas não impede completamente a aglomeração. O papel principal da água deve ser o de participar da hidratação das partículas, recobrando-as e proporcionando uma dispersão mais suave na estrutura. Portanto, a água não deve ser considerada o principal dispersante, mas sim um auxiliar importante nesse processo.

### **2.6.3. Consumo de cimento**

O consumo de cimento dentro da mistura, é um fator determinante para que todos os fatores que englobam o concreto em seu estado fresco, como a exsudação, consumo de água, e coesão, e em seu estado endurecido como a resistência, e durabilidade (TAYLOR, 2013) funcionem de acordo com o esperado.

Segundo Abrams (Properties of concrete, 1923) as quantias de adições incorporadas dentro da mistura podem ser consideradas nesse quesito, uma vez que as adições garantem um menor índice de porosidade no concreto endurecido.

A partir da determinação da quantia de aglomerante na mistura, é possível determinar a quantia de adição comportada na mistura, conforme preconiza a NBR 12655:2015 (Concreto de Cimento Portland — Preparo, controle, Recebimento e Aceitação — Procedimento) a utilização recomendada dos fatores A/C (Lei de ABRAMS, 1932) deve variar entre 0,45 e 0,65. Portanto, conclui-se que, para ocorrer o processo de hidratação do cimento, ocorrendo a liberação dos íons de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), silicato ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ) e aluminato ( $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ), os íons liberados reagem rapidamente com a água, formando os primeiros produtos de hidratação, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) (NEVILLE, 2015) resultando então, em uma camada de gel, dificultando a passagem de água nas partículas de cimento não hidratadas. E sabemos que a quantia de água e o consumo de cimento são diretamente inversos e ligados ao desempenho final da mistura, (TAYLOR et al., 1925)

## **2.7. Adições minerais**

Segundo Neville, em Concrete Properties (2015), a incorporação de materiais “suplementares”, conhecidos hoje como as adições deu-se inicialmente pelo aumento brusco dos custos de energia, da relação de custo menor em relação ao cimento e pela grande quantia de estoques e descartes destes materiais, que passavam ou não por algum tipo de beneficiamento, por se tratar de materiais de descarte industriais. Esses materiais que podem ser escórias de alto forno, resíduos de processos industriais (cinzas volantes e pozolânas).

De acordo com Neville (1923) um filler ou uma adição mineral pode ser definido como sendo um material mineral natural ou orgânico, desde que não seja um material cimentício. As utilizações de materiais como escórias, escórias de alto forno, materiais calcários, materiais pozolânicos, ou cinzas volantes, produzem um grande diferencial econômico nas formulações dos concretos que produzimos hoje, sendo um dos produtos com maiores custos x benefícios atualmente, e também por se tratar de materiais sustentáveis, sendo incorporado no concreto.

## 2.8. Adições pozolânicas

Inicialmente, as escórias de alto forno, e as cinzas volantes são empregadas no concreto pelas grandes fontes de sílica-alumina, que atuam como precursores no concreto, ao reagir com o hidróxido de cálcio (CH), gerado na hidratação do cimento, forma silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio hidratados, que contribuem para a resistência e durabilidade do concreto (NEVILLE, et al. 1998).

Também, atuam no empacotamento da mistura, pela sua distribuição granulométrica e atuam como pontos de centralização para os produtos da hidratação do cimento, promovendo o efeito de tamponamento dos poros. (ISAIA; GASTALDINI; MORAES, 2003)

A sua incorporação pode contribuir para a redução da pegada de carbono e também reduzir a pressão econômica com o uso de resíduos.

Ao que se refere as propriedades mecânicas após as adições desses materiais, estudos recentes das Universidade de Ghent, Departamento de Engenharia Estrutural e Materiais de Construção (ETCHEVERRY et al., 2024) mostram uma reatividade significativa no concreto, proporcionando propriedades mecânicas e durabilidade superiores no concreto. Além disso, esses materiais possuem vantagens como aumento da resistência final maior do concreto, devido a sua curva menos acentuada de crescimento, em relação a concretos sem adições, a baixa condutividade térmica, a elevada estabilidade volumétrica, resistência ao fogo e a resistência à erosão. (SUN et al., 2023)

As adições destes materiais podem apresentar porcentagens diferentes nas formulações, podendo variar de acordo com as propriedades dos materiais utilizados, recursos do tipo escórias de alto forno tem maiores propriedades reativas no concreto e materiais pozolânicos apresentam um desempenho mais longínquo. Entretanto, as determinações das aplicações demandam muito tempo, levando em conta que, para a coleta de resultados de resistência por exemplo, a idade do concreto deve ter um tempo de cura maior ou igual a 90 dias, onde podemos constatar uma diferença em potencial sobre a melhor proporção, e a curva de crescimento atingir uma estabilidade.

Segundo a NBR 16697:2018 no ela descreve os materiais pozolânicos como materiais silicosos ou silicoaluminosos, que possuem pouca ou nenhuma atividade hidráulica por si mesmos, reagem com o hidróxido de cálcio, na presença de água e à temperatura ambiente, quando finamente divididos, formando compostos com

propriedades cimentícias. O uso desta pozolâna no concreto também proporciona uma durabilidade superior, aumentando a vida útil do concreto e mitigando patologias comuns, como a reação álcali-agregado (RAA) e a difusão de cloro em ambientes marinhos.

Segundo a NBR 12655:2015, a adição de materiais pozolânicos é permitida e pode contribuir significativamente para a durabilidade e resistência do concreto, especialmente em ambientes agressivos, como aqueles com alta presença de sulfatos. A norma estabelece que um cimento com menos de 8% de C3A deve passar por testes para certificar sua resistência a sulfatos, enquanto um cimento que contenha mais de 25% de adição pozolânica já é considerado resistente. Também, seguindo os requisitos descrito pela NBR 5752:2014 de materiais pozolânicos, destinados ao uso com cimento Portland em concreto.

## **2.9. Adições carbonáticas**

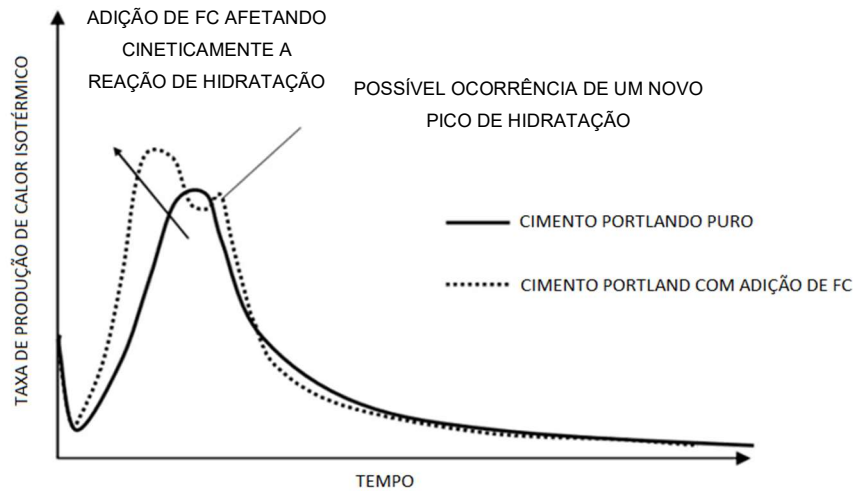
O uso de materiais carbonáticos, como o calcário, no concreto tem sido amplamente estudado e utilizado na construção civil devido às suas propriedades benéficas. Segundo a pesquisa de Pavía et al. (2017), a adição de calcário ao concreto pode melhorar sua durabilidade e resistência à compressão. De acordo com Aitcin (2008), a utilização de materiais carbonáticos no concreto também pode contribuir para a redução das emissões de dióxido de carbono na indústria da construção, promovendo práticas mais sustentáveis e ambientalmente amigáveis.

De maneira geral, os textos literários destacam que uma taxa de substituição de 10% a 20% de FC em concretos proporciona um desempenho técnico adequado, muito parecido com as misturas elaboradas somente com CP. Já o "efeito filler" é responsável por preencher os vazios entre as partículas de cimento, melhorando a compactação e aumentando a resistência do concreto. (TSIVILIS et al., 2003)

Entre os vários benefícios advindos deste efeito pode-se destacar: a redução na demanda de água, minoração da exsudação e, nos concretos endurecidos, o bloqueio dos poros capilares diminuindo a penetração de agentes agressivos. (TSIVILIS et al., 2003)

Além disso, a finura do FC também melhora a trabalhabilidade do concreto, facilitando sua aplicação e compactação. Isso resulta em uma melhor qualidade estética da superfície do concreto, com menos imperfeições e maior durabilidade.

**Figura 4 – Efeito do filler Calcário no Concreto**



Fonte: Adaptado de Effect of limestone filler as mineral addition in self-compacting concrete. (Efeito do filler calcário como adição mineral em concreto auto adensável), 2011.

A redução da exsudação e também a diminuição da permeabilidade (Miao et al. (2020) do concreto proporcionadas pelo FC contribuem para uma maior resistência à penetração de substâncias nocivas, como cloretos e sulfatos, aumentando assim a vida útil da estrutura. Em resumo, a utilização do filler contribui significativamente para a melhoria das propriedades do concreto, tornando-o mais resistente, durável e sustentável. (TSIVILIS et al., 2003)

Além disso, a presença de auxiliares na composição do filler calcário pode ajudar a acelerar as reações de hidratação, resultando em uma maior resistência à compressão. A combinação da finura do filler calcário com esses auxiliares também contribui para a diminuição da evaporação, o que por sua vez reduz as microfissuras plásticas e aumenta a durabilidade do material. Assim, é possível obter um concreto mais resistente e durável, capaz de suportar melhor as cargas e condições ambientais adversas. (ESPING, 2008)

Essa modificação na cinética das reações dos grãos de cimento Portland resulta em uma maior resistência mecânica e durabilidade do material final. O aumento do grau de hidratação proporcionado pelo FC também contribui para a redução da porosidade e aumento da compacidade da matriz cimentícia, tornando-a mais resistente à penetração de agentes agressivos, como água e íons cloreto. Dessa forma, a incorporação do FC ao material cimentício é essencial para melhorar suas

propriedades físicas e químicas, garantindo um desempenho superior em diversas aplicações na construção civil. (KADRI; DURVAL, 2002).

Com isso, a presença do FC na mistura proporciona um ambiente propício para o crescimento dos cristais, não apenas nas superfícies dos grãos de CP, mas também nas superfícies das partículas de FC. Isso resulta em um aumento nas reações químicas e modificações na tipologia dos produtos de hidratação formados. A nucleação heterogênea desempenha um papel fundamental nesse processo, uma vez que as partículas menores do FC preenchem os vazios e aumentam a densidade da mistura, favorecendo a formação de pontos de nucleação para os produtos de hidratação.

Assim, a interação entre o CP e o FC durante o processo de hidratação contribui significativamente para a evolução e qualidade dos produtos finais. Isso ocorre porque, com a diminuição dos espaços disponíveis, os átomos e moléculas presentes no material têm menos espaço para se mover e se organizar. Isso resulta em uma maior probabilidade de formação de múltiplos cristais menores, em vez de um único cristal grande. Esses cristais menores tendem a se formar mais rapidamente e ocupar os espaços disponíveis de maneira mais eficiente, levando à formação de uma estrutura cristalina mais densa e compacta. Assim, a diminuição dos espaços favorece a formação de um grande número de cristais pequenos em vez de poucos cristais grandes. (HEMALATHA; SANTHANAM, 2018; MEHDIPOUR et al., 2017)

## **2.10. Agregados secos**

### **2.10.1. Definições**

Nos estudos de dosagem, a escolha dos agregados tem um papel importante nas características finais e resultados das resistências do concreto (CURTI, 2022) seja a escolha caracterizada pela disponibilidade regional, situada na região mais próxima da central de produção, a escolha de acordo com a necessidade de desempenho do concreto e compatibilidade com os demais agregados constituintes do concreto, como cita J. J. Brooks (2010) em "Concrete Technology". As características dos materiais que antes chamávamos de materiais inertes ao concreto, tem grandes impactos do desempenho e eficácia do método, podendo a sua compatibilização afetar parâmetros como relação água / cimento de Duff. (1919)

Algumas definições e características são indispensáveis para que aja desde uma reologia, homogeneidade no concreto, fatores que afetam diretamente a trabalhabilidade no lançamento do concreto, retrações, volume, exsudação, desempenho, e custo benefício da mistura. Algumas características definidas pelas Normas Brasileiras regem os parâmetros mínimos e requisitos dos agregados, para que possam ser incorporados e caracterizados como agregados para concretos de cimento Portland. Segundo a NBR 7211:2005 são definidos os requisitos exigidos desde a recepção e a produção dos materiais, aplicada somente aos materiais de origens naturais. A norma define a distribuição granulométrica associada a dimensão máxima do agregado de acordo com a abertura das peneiras, o módulo de finura e a distribuição granulométrica de acordo com as faixas de utilização.

A granulometria dos agregados influencia as propriedades do concreto, pois uma mistura bem graduada permite uma melhor compactação e reduz a necessidade de água (AÏTCIN, 1998). O uso de agregados com características específicas, como forma e textura, também pode melhorar a aderência da pasta de cimento, resultando em um produto final mais homogêneo e resistente (MINDESS; YOUNG; DARWIN, 2003).

Portanto, a seleção criteriosa dos agregados é crucial para a obtenção de concretos de alta qualidade.

### **2.10.2. Agregado graúdo**

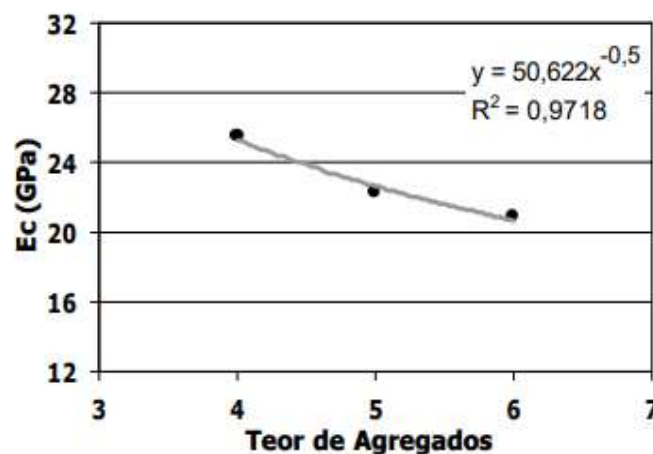
Inicialmente, ao tratarmos dos parâmetros que levam as qualificações e quantificações sobre a quantia dos agregados graúdos nas misturas, é importante ressaltarmos os benefícios que levam a dosagem correta e sistemática na dosagem. (SILVA; MELO; GEYER, 2023)

Segundo Neville, a dosagem correta do agregado graúdo no concreto tem relações com a resistência mecânica a compressão superior (NEVILLE; AÏTCIN, 1998), uma vez que o agregado graúdo oferece uma resistência maior em relação a argamassa devido a sua maior área de contato com a superfícies dos agregados, e menor absorção de água (KAPLAN, 1989), outro fator importante é a relação do consumo de água que pode ser absorvida pela área de agregado graúdo, logo, ao trabalharmos com uma determinada quantia de agregado graúdo maior, teria uma

absorção maior de água, reduzindo o fator água / cimento da mistura. (NEVILLE; AİTCIN, 1998).

Por outro lado, e segundo estudos com base nos módulos de elasticidade do concreto, por Melo Neto e Helene (2002), devemos também nos ater ao comportamento do concreto quando tratado da quantia de agregado graúdo, pois a trabalhabilidade do concreto, e sua reologia também dependem dos teores destes agregados, e segundo eles, ao aumentar o consumo (teor) de agregado na mistura, mantendo o abatimento constante, resulta em uma diminuição do valor do módulo de deformação, conforme apresentado na imagem 5 (ACACIO et al., 2002). Segundo os autores, o aumento do teor de agregados, para um mesmo valor de abatimento, leva a um aumento da relação água-cimento, o que por sua vez, oferece uma pasta com resistência reduzida e um módulo menor, resultando em uma menor resistência à compressão.

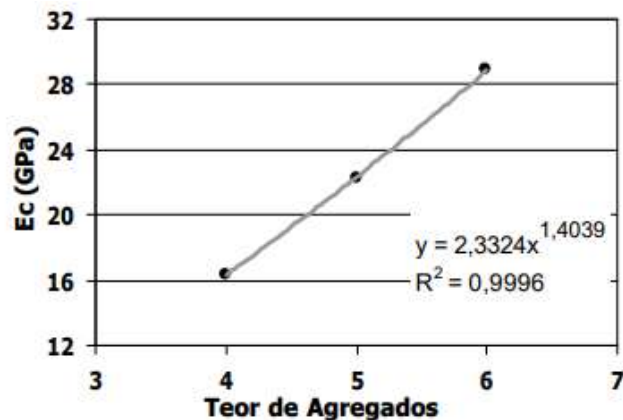
**Figura 5 - Teor de Agregado Graúdo x Abatimento x EC**



Fonte: Módulo de Elasticidade: Dosagem e Avaliação de Modelos de Previsão do Módulo de Elasticidade de Concretos, 2002 p. 13)

No entanto, ao manter constante a relação água-cimento, por meio de outros mecanismos e alterações dentro da pasta, como teor de argamassa, foi observado um aumento no valor do módulo, conforme ilustra a imagem 6, abaixo:

**Figura 6 - Agregado Graúdo x EC**



Fonte: Módulo de Elasticidade: Dosagem e Avaliação de Modelos de Previsão do Módulo de Elasticidade de Concretos, 2002 p. 13)

Podemos então, expressar essas condições pela seguinte relação:

### **Relação 1 – Consumo de H<sup>2</sup>O e Agregado Graúdo**

$$\text{Consumo de água} \propto \frac{1}{\text{Agregado Graúdo}} \quad (01)$$

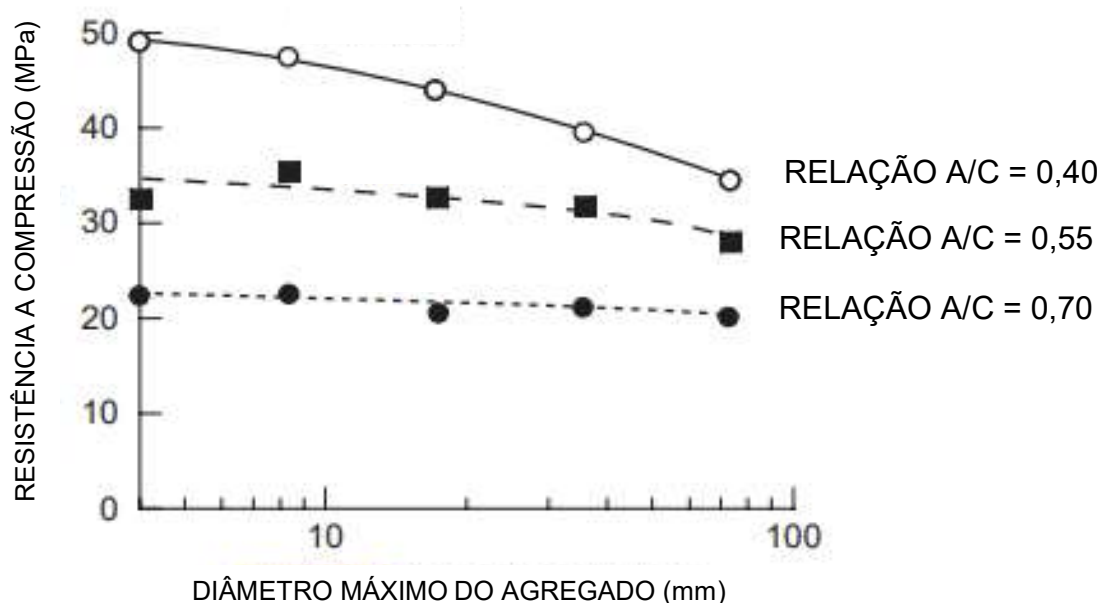
Os agregados graúdos atuam como um suporte que aumenta a resistência mecânica e a estabilidade do concreto. Quando a quantidade desses agregados é adequada, eles contribuem para equilibrar a proporção de água, já que um excesso de água seria necessário se a fração de agregados não preencher os vazios de forma adequada. (AÏTCIN, 1998)

Isso significa que, a fim de reduzirmos os consumos de água de uma determinada mistura, ou seja aos nos referirmos a concretos com sua relação água / cimento alta, à medida que aumentamos o teor de agregado graúdo, na mistura, o consumo de água tende a diminuir, pois, isso implica em uma menor demanda de pasta de cimento para revestir (envolver) as partículas, mantendo o entendimento sobre a trabalhabilidade e coesão da mistura. (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Este fator também pode ser observado nas propriedades individuais da mescla de agregados graúdos, ao incrementarmos duas ou mais tipos de dimensões do material utilizado a fim de obter uma coesão e preenchimento dos espaços vazios dentro da estrutura do

concreto, tratando especificamente da escolha das porcentagens individuais de diâmetros diferentes.

Assim como demonstra Neville, outro fator secundário sobre a trabalhabilidade em concretos com relações água / cimento mais elevados, resulta em quantias de água maiores, conseqüentemente, ocorre um aumento na trabalhabilidade, o que permite, um teor de agregado com granulometrias maiores incorporados na mistura, e vice-versa (NEVILLE, 2015). Assim, quando aumentamos o teor de materiais cimentícios de mistura, ou seja, em concretos com relações de a qualidade da pasta aumenta, logo obtemos valores de retração, calor de hidratação maiores, obtendo valores de 40% a 80% um aumento na resistência (NEVILLE, 2015). Desta maneira este fator leva em conta, que, quanto maior o teor de argamassa estabelecido, podemos ter consumos maiores de agregado graúdo com diâmetros maiores, pois a quantia de materiais finos, tende a ter uma capacidade maior de cobertura desse agregado graúdo e empacotamento dos grãos.

**Figura 7 – Diâmetro do agregado graúdo e resistência**



Fonte: Adaptado do livro Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais, 2015 p. 57

Em outras situações, o consumo de agregado graúdo é relacionado ao calor de hidratação e a retração no concreto, pelo efeito da diluição, uma vez que a proporção da pasta de cimento é reduzida, produzindo um menor dano a aderência entre os agregados e aos materiais cimentícios. (POPOVICS, 1990)

Como demonstrou Roger (1947), a quantia de agregado graúdo, também é relativa ao diâmetro máximo do agregado a ser utilizado, pois, ao envolver o agregado na pasta, o teor de argamassa deve ser suficiente para que haja o mínimo de cobrimento do agregado (WEINBERG; KRAVTZOFF; VALLETTE, 1947), ou seja, podemos classificar que, quanto maior o diâmetro do agregado, maior deverá ser o teor de argamassa da mistura, para que ocorra o cobrimento mínimo necessário.

**Tabela 4 – Tabela 6 da NBR 7211:2022**

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada	
	Zona granulométrica (d/D1)	
	9,5 / 25,0	19 / 31,5
75 mm	-	-
63 mm	-	-
50 mm	-	-
37,5 mm	-	-
31,5 mm	-	0 - 5
25,0 mm	0 - 5	5 - 25 <sup>2</sup>
19,0 mm	2 - 15 <sup>2</sup>	65 <sup>2</sup> - 95
12,5 mm	40 <sup>2</sup> - 65 <sup>2</sup>	92 - 100
9,5 mm	80 <sup>2</sup> - 100	95 - 100
6,3 mm	92 - 100	-
4,75 mm	95 - 100	-
2,36 mm	-	-

Fonte: Adaptado da tabela 6 da NBR 7211:2022 (pág. 8)

Também, a NBR 7211:2022 define os limites das faixas granulométricas para as graduações dos materiais classificados como agregados graúdos, e com isso, estabelece as zonas de graduação ótimas e uteis, sendo possível realizarmos uma mescla (B; E, 1907) dos agregados graúdos disponíveis a fim de encontrar uma distribuição mais homogênea para a mistura.

De acordo com os estudos de Fuller (1907), que propõem as curvas de distribuição granulométricas com base no empacotamento otimizado da mistura, para cada dimensão dos agregados, podemos então, a partir da determinação dos módulos de finura dos agregados graúdos em utilização, nas suas curvas granulometrias, utilizar referências dos parâmetros definidos por ele, como zonas de graduação mínimas e máximas, interpolar os valores retidos em cada peneira e determinar a

porcentagem mais adequada para um teor de argamassa adotado. Já segundo Neville (1995), ao aumentarmos a resistência do concreto, uma quantia maior de agregados menores, ou seja, uma mistura com um menor índice de finura, tende a ter uma melhor aderência na pasta de cimento (aglomerante e água).

### **2.10.3. Agregado miúdo**

As propriedades dos agregados têm um efeito significativo no comportamento do concreto fresco e endurecido (QUIROGA P., FOWLER D., 2004). Embora esses efeitos variem continuamente com o tamanho das partículas, muitos métodos como o método da ACBP e o método ACI, trazem os agregados graúdos em cálculos compensatórios volumétricos, ou seja, a estimativa da quantia de agregado miúdo é definida pela compensação do volume faltante, acrescidos pelos valores já estimados na composição da mistura, e o seu teor de ar incorporado previsto.

A utilização apropriada dos agregados miúdos é fundamental para obter as propriedades desejadas no concreto. De acordo com Smith e Jones (2020), "os agregados miúdos desempenham um papel crucial na trabalhabilidade, resistência e durabilidade do concreto". Nesse sentido, Silva e Oliveira (2018) afirmam que "a granulometria e a finura dos agregados miúdos influenciam diretamente a demanda de água da mistura, afetando a trabalhabilidade e a resistência final do concreto". Em um estudo realizado por Garcia et al. (2021), os autores observaram que "o teor e as características dos agregados miúdos podem otimizar a compacidade do concreto, reduzindo a porosidade e melhorando a durabilidade". Portanto, a seleção adequada dos agregados miúdos é essencial para o desempenho satisfatório do concreto.

Também, como citam J. B. de Aguiar, e V. M. Ferreira em seus estudos em "Influência da composição do concreto na sua resistência à compressão" apresentam uma relação entre a resistência mecânica e os teores de argamassa, uma vez que sabemos que, a resistência mecânica do concreto é diretamente relacionada com o teor de argamassa da mistura. Também, estudos (Neville, 1995) mostram uma relação entre a utilização de materiais de granulometrias mais fina, para concretos com teores de argamassa mais baixos, em situações em que temos que preencher os vazios com grãos mais finos no seu empacotamento total da mistura devido ao baixo índice de grãos de granulometrias menores.

Em geral, a composição do concreto, incluindo o teor de argamassa, deve ser definida de modo a atender aos requisitos de resistência, trabalhabilidade e durabilidade. Portanto, a NBR 6118:2023 corrobora a relação inversa entre o teor de argamassa e a resistência à compressão do concreto. Ela afirma que, quanto menor o teor de argamassa, maior a resistência do concreto. Essa informação está alinhada com o que é amplamente discutido na literatura técnica sobre tecnologia do concreto, como observado nas citações de autores como Neville, Mehta e Monteiro.

Seguindo os estudos de Fuller (1907), a curva ideal proposta por ele segue uma função matemática específica, dada pela pesquisa:

#### Equação 4 – Equação de Fuller

$$y = 100 \times \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (04)$$

Fonte: Adaptado de Fuller et al. (1907)

Onde, P é a porcentagem passante na peneira de abertura "d" e D é a dimensão máxima do agregado

**Tabela 5 – Tabela de Correlação do Diâmetro e % de Material**

DIÂMETRO DA PENEIRA	% DE MATERIAL PASSANTE
<b>D #9,30</b>	100
<b>D/2 #6,30</b>	71
<b>D/4 #4,17</b>	50
<b>D/8 #2,36</b>	35
<b>D/16 #1,18</b>	25
<b>D/32 #0,600</b>	18
<b>D/64 #0,300</b>	12
<b>D/128 #0,150</b>	9
<b>D/256 #0,075</b>	6
<b>D/512 #0,01</b>	4

Fonte: Adaptado de The Laws of Proportioning Concrete (1907 p. 6)

Com isso, podemos observar a seguinte situação: Ao reduzir os teores de argamassa, aumentamos em sua maioria os teores dos agregados secos graúdos (NEVILLE, BROOKS, 2013), e com base nos estudos das curvas granulométricas de Fuller (1907) e Bolomey (1925) afim de potencializar o empacotamento devido ao grau elevado de vazios, os módulos de finura da mistura serão reduzidos.

Também, a partir NBR 7211:2022 obtemos as zonas de graduação e distribuição granulométrica do agregado os valores limites das zonas de graduação, proposta pela imagem abaixo:

**Tabela 6 – Tabela granulométrica NBR 7211:2022**

PENEIRA COM ABERTURA DE MALHA (mm)	PORCENTAGEM, EM MASSA, RETIDA ACUMULADA			
	LIMITES INFERIORES		LIMITES SUPERIORES	
	PERFIL UTILIZÁVEL	PERFIL ÓTIMO	PERFIL ÓTIMO	PERFIL UTILIZÁVEL
<b>9,5</b>	0	0	0	0
<b>6,3</b>	0	0	0	7
<b>4,75</b>	0	0	5	10
<b>2,36</b>	0	10	20	25
<b>1,18</b>	5	20	30	50
<b>0,600</b>	15	35	55	70
<b>0,300</b>	50	65	85	95
<b>0,150</b>	85	90	95	100

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7211 (2022, p. 5.)

Já a curva de Bolomey (1925), incrementou o cimento através da curva de Fuller, um parâmetro que considera o tipo de concreto, e os agregados, em função do abatimento desejado da mistura, dada pela equação abaixo:

**Equação 5 – Curva de Bolomey**

$$y = A + (100 - A) \times \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (05)$$

Onde “y” é a porcentagem passante pela malha da peneira, “D” e “d” representam o diâmetro máximo do agregado e a abertura de peneira, respectivamente, já o valor de “A” representa um coeficiente que depende da forma do agregado e da consistência do concreto.

### **2.11. Adição de aditivos**

Os aditivos para concreto consistem em substâncias químicas que, ao serem incorporadas à mistura, podem promover alterações em suas propriedades físicas e mecânicas. Esses aditivos podem ser classificados em diversas categorias, incluindo plastificantes, superplastificantes, estabilizadores e aceleradores, sendo cada um deles destinado a funções específicas, como a melhoria da trabalhabilidade, o aumento da resistência e o controle do tempo de pega, corte de água, entre várias funções e resultados obtidos com a utilização dos aditivos. (NEVILLE, 2015)

Por exemplo, os plastificantes utilizados neste estudo reduzem a quantidade de água necessária, permitindo uma mistura mais fluida sem comprometer a resistência final (MINDESS et al., 2003), e também aumentam a janela do tempo de pega, em determinadas dosagens, pode ser significativamente considerável, comumente utilizados em concretos dosados em central.

Já os superplastificantes, como citam os autores Rixom e Mailvaganam (1999), tem mais eficiência na redução de água na mistura, aumentando também sua fluidez, por conta de uma redução significativa nas tensões de escoamento das partículas do cimento. Porém, outros autores consideram uma perda dessa fluidez em um curto espaço de tempo (ACI 212.4R, 1993; SAKAI & MASAKI, 1994; MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1994; BIAGINI, 1995), necessitando assim, a realização de combinações de aditivos. Pastas de cimento com baixas relações  $C_3S/C_2S$  e  $CaNC_4AF$  apresentam maior viscosidade quando a adição do superplastificantes é retardada (NAWA et al. apud RIXOM & MAILVAGANAM, 1999). Existe também uma correlação entre a quantidade de superplastificantes absorvido pelo cimento e a viscosidade (ASAKURA et al.; RIXOM & MAILVAGANAM apud RIXOM & MAILVAGANAM, 1999). Para um nível específico de adição de SNF, a área superficial do cimento é diretamente proporcional à viscosidade (NAWA & EGUCHI apud RIXOM & MAILVAGANAM, 1999).

Além disso, a adição dos novos materiais disponíveis direta nos cálculos das curvas em laboratório, como a escolha dos aditivos e suas tecnologias aplicadas hoje dentro do mercado, pode contribuir e afetar ainda mais parâmetros iniciais das dosagens, bem como os consumos dos materiais ligantes, como cimento e as adições, tornando-o a quantia de aglomerantes ainda mais econômica. Benefícios que trazem essas incorporações que vão em direção ao fator das reduções de CO<sub>2</sub> no meio ambiente, uma vez que essas incorporações tendem a reduzir os consumos de cimento nas misturas.

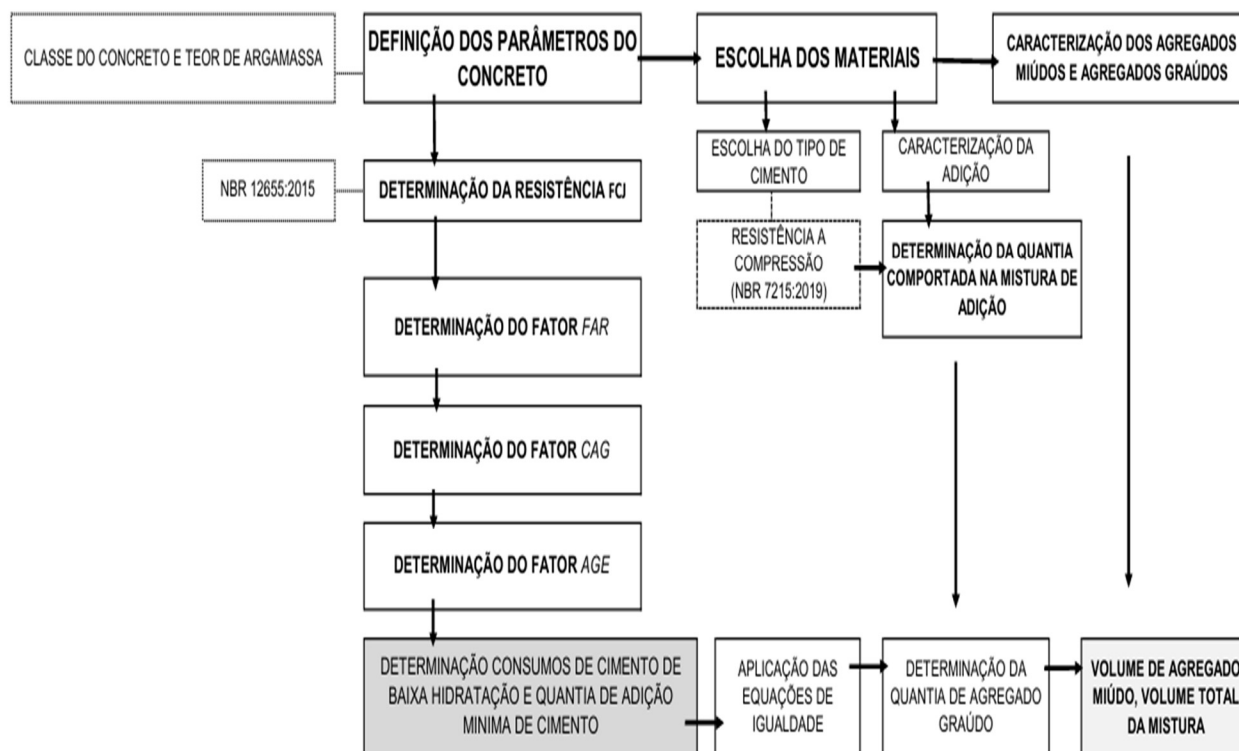
Inicialmente, ao tratarmos das variedades de aditivos disponíveis hoje no mercado, devemos destacar os parâmetros considerados pela NBR 11768-1:2019 (Requisitos), onde estabelece os requisitos para os aditivos químicos destinados ao concreto e suas classificações.

### **3. METODOLOGIA**

A metodologia que será empregada no decorrer deste trabalho é proposta por um fluxograma simplificado, definindo as principais etapas que constituem os parâmetros adotados, partindo da escolha do concreto, a escolha dos materiais, a caracterização dos mesmos, e a aplicação das equações com base nos estudos preliminares do referencial teórico.

Teremos, na sequência experimental, a divisão por etapas, caracterizadas pelas informações principais, assim como descrito pelos métodos anteriormente, precisamos conhecer, as características desejadas para cada traço experimental na dosagem, inicialmente pela resistência requerida, tipo do cimento Portland que será utilizado, adições minerais e cimentícias, distribuições granulométricas dos agregados miúdos e graúdos, teor de argamassa desejado, e em relação ao abatimento (NBR16889:2020), propõem-se um valor nominal de 120+/-20 mm e aditivos específicos.

### Fluxograma 3 – Fluxograma Simplificado da Metodologia



Fonte: Autor, 2024.

O fluxograma de tendência, faz uma alusão aos princípios adotados como redução nos consumos de água, adição de novos materiais e características que foram abordadas na metodologia deste trabalho, e de forma simplificada os resultados esperados com este estudo. Também, pode ser comparado a um sistema em constante mudança, onde diferentes fatores interagem ao longo do tempo. A agressividade ambiental reflete os impactos negativos da produção de concreto, como a extração de matérias-primas e a emissão de carbono. À medida que a indústria se expande, é essencial monitorar esses efeitos para mitigar danos ao meio ambiente. A adição de novos materiais, como aditivos, materiais minerais e agregados reciclados, representa inovações que podem melhorar a eficiência do concreto e reduzir seu impacto ambiental.

E finalmente, um desempenho constante sugere que, apesar das pressões, a indústria de concreto deve buscar um equilíbrio entre a demanda e a responsabilidade ambiental.

### **3.1. Definições**

As avaliações constituídas e desenvolvidas por meio das pesquisas relacionadas aos métodos já difundidos (ACI, ABCP, IPT, ITERS, ACI, IBRACON) hoje no Brasil, apresentadas anteriormente no presente trabalho, busca aprimorar os consumos de materiais por meio de fatores pré-definidos, com valores tabelados, resultados das pesquisas presentes no referencial teórico anteriormente e a aplicabilidade de cada tipo de concreto, suas particularidades e necessidades como resistência a compressão, módulo de elasticidade, resistência a tração por flexão, tração por compressão diametral e para estruturas ou projetos que irão receber o lançamento do concreto. Portanto, leva parâmetros diferentes por resultar em uma curva de dosagem onde engloba materiais diferentes e adições que hoje estão presentes no Brasil, disponibilizados no mercado, bem como suas características e finalidades.

Com tudo, ainda reforça parâmetros definidos nos estudos mencionados anteriormente como a definição da resistência média, diâmetro máximo dos agregados graúdos, relações água/cimento máximas, curvas de distribuições granulométricas e normatizações.

Embora, trazendo em termos simplificados como fatores, expressados com relações definidas com base em estudos práticos realizados em laboratório, afim de otimizar os processos de desenvolvimento de curvas de dosagem em laboratório e desvios entre os resultados obtidos laboratório e nas centrais, pois de maneira interativa, busca incorporar mais materiais que passam e ou, recebem algum tipo de beneficiamento ou controle, antes de serem incorporados na mistura, logo, resultado em materiais com menos desvios junto aos resultados das centrais.

Por fim, podemos resumir o contexto teórico da metodologia em um objetivo geral: manter os desempenhos exigidos pelas normas brasileiras, com custos e agressividade ambiental reduzidos, demonstrando a capacidade da incorporação de novos materiais e visando reduções nos consumos de água, e conseqüentemente consumos de cimento e menos agressividade ambiental e emissões de CO<sub>2</sub>.

Também, as relações de materiais secos e aglomerantes seguem um parâmetro final simples que é o teor de argamassa, parâmetro necessário para se ter uma trabalhabilidade, e reologia adequada para as aplicabilidades necessárias hoje. Porém, o método que será adotado neste trabalho, é caracterizado por levar as faixas

granulométricas e a distribuição dos diâmetros máximos dos agregados miúdos e agregados graúdo nas relações individuais de cada etapa, ou seja, as características dos materiais que antes chamávamos de materiais inertes ao concreto, tem grandes impactos do desempenho e eficácia do método, podendo a sua compatibilização afetar parâmetros como relação água cimento, resistência mecânica, trabalhabilidade e reologia final do concreto.

### **3.2. Escolha dos agregados**

No estudo, a escolha dos agregados foi realizada com base na disponibilidade da região, buscando composições econômicas e seletivas no estado do Rio Grande do Sul. Levando em consideração uma melhor proporção na mistura, e disponibilidade mais comuns das centrais dosadoras, tendo limitações com no uso dos materiais secos, serão utilizados dois tipos de areias do tipo naturais como materiais miúdos, e também, dois tipos de agregados graúdos, ambos os materiais provenientes de mineradoras e pedreiras localizadas no estado. A coleta dos materiais foi realizada com base nas recomendações propostas pela NBR 16915:2021 até o laboratório.

Os parâmetros que serão adotados nas dosagens, são caracterizados por levar as faixas granulométricas e escolha dos percentuais dos agregados miúdos e agregados graúdo nas relações individuais de cada etapa, sendo obtidas por meio de mesclas de compatibilização e finalidades.

#### **3.2.1. Caracterização dos agregados miúdos**

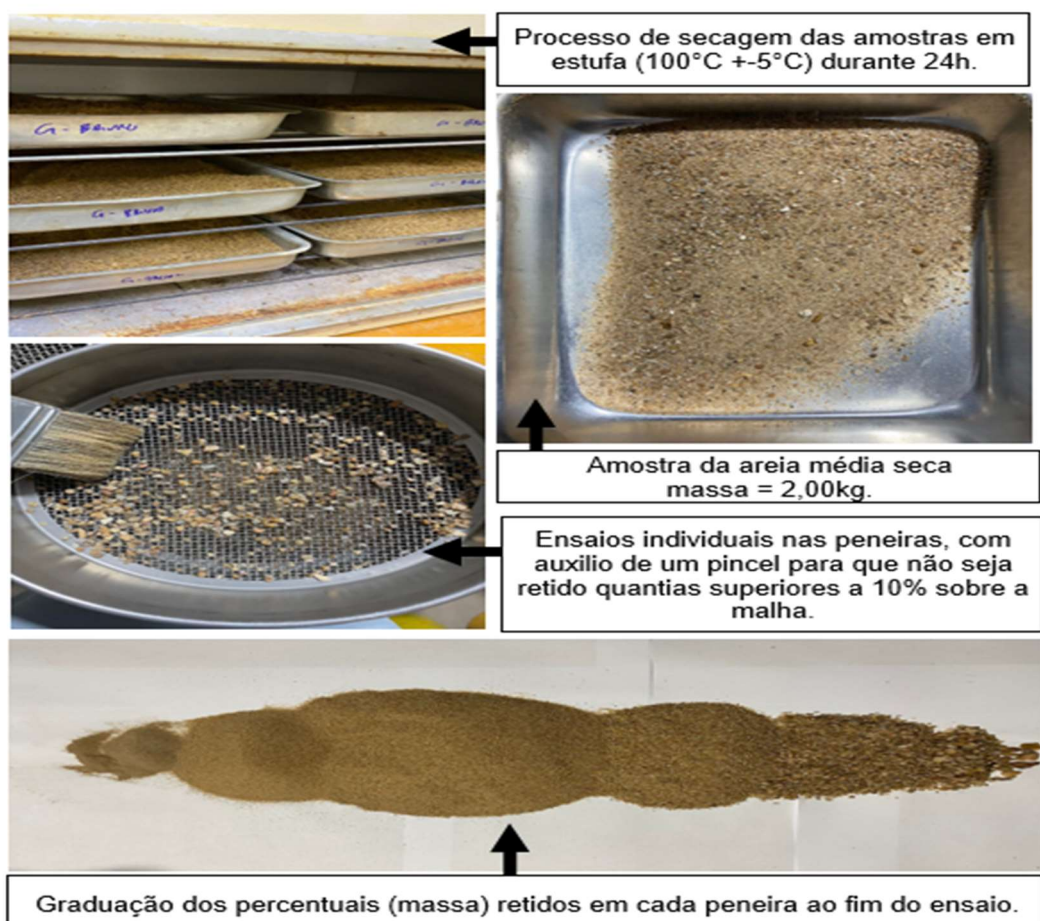
Os agregados miúdos, foram divididos em duas classificações iniciais, areia média e areia grossa. Os agregados secos miúdos naturais, propriamente ditos, são as areias provenientes da natureza (escavadas ou dragadas dos rios) e os agregados originários de processos industriais, tais como as areias industriais que são utilizadas em misturas nas dosagens de concreto. O trabalho visa a utilização dos agregados miúdos naturais, devido a sua facilidade de acesso na região, disponibilidade, armazenamento com menor custo em relação as aos materiais provenientes de beneficiamentos industriais, uma vez que os agregados industriais devem ser armazenados sem contato com as intempéries, em locais cobertos.

A disposição da curva granulométrica dos agregados presentes no estudo foi realizada com base na NBR 17054:2022, classificadas em areia grossa e areia média.

A mesma, determina as malhas das séries normais e intermediárias, para o ensaio, e os equipamentos necessários.

O método de ensaios granulométrico, os procedimentos e as quantidades de cada material, foram realizados com base nas especificações da NBR 17054:2022. Inicialmente a amostra completa de cada material foi seca, por 24 h a temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  em estufas, posteriormente foram separadas as amostras de 1,00kg, pesadas individualmente, juntamente com as peneiras de serie normais e intermediárias (Tabela 1 – NBR17054:2021). O processo da agitação foi realizado manualmente, destacando a peneira superior e realizando a agitação com o fundo falso, até que o material passante pela peneira seja menor a 1% da massa do material retido.

**Figura 8 – Ensaio Granulometria dos Agregados Miúdos**



Fonte: Autor, 2024.

Os módulos de finura referente ao somatório das massas retidas acumuladas nas peneiras de serie normal e diâmetro máximo da peneira ao qual apresenta % retida acumulada  $< 5,0\%$  foram realizados após o ensaio.

A determinação da massa específica do agregado graúdo foi realizada com base nas especificações da NBR 16916:2021. O ensaio consiste em determinar a massa específica do material pela volumetria, inicialmente foram utilizados dois francos com tampas com capacidades de 500ml (V), devido a necessidade de realizar o procedimento em duplicata, como mostra a figura 9. Após a determinação das massas dos recipientes, foi separado 500g de material (MA), medidos individualmente, posteriormente adicionados aos frascos e determinadas as massas do frasco + material (MC), após, os frascos foram completados com água, até a marca de 500ml do frasco, e determinada a massa do recipiente + massa do material + massa da água adicionada (MD), e com isso determinada a massa de água adicionada no frasco (VA) até atingir a calibração de 500ml.

**Figura 9 – Ensaio da Determinação da Massa Especifica do Agregado Miúdo**

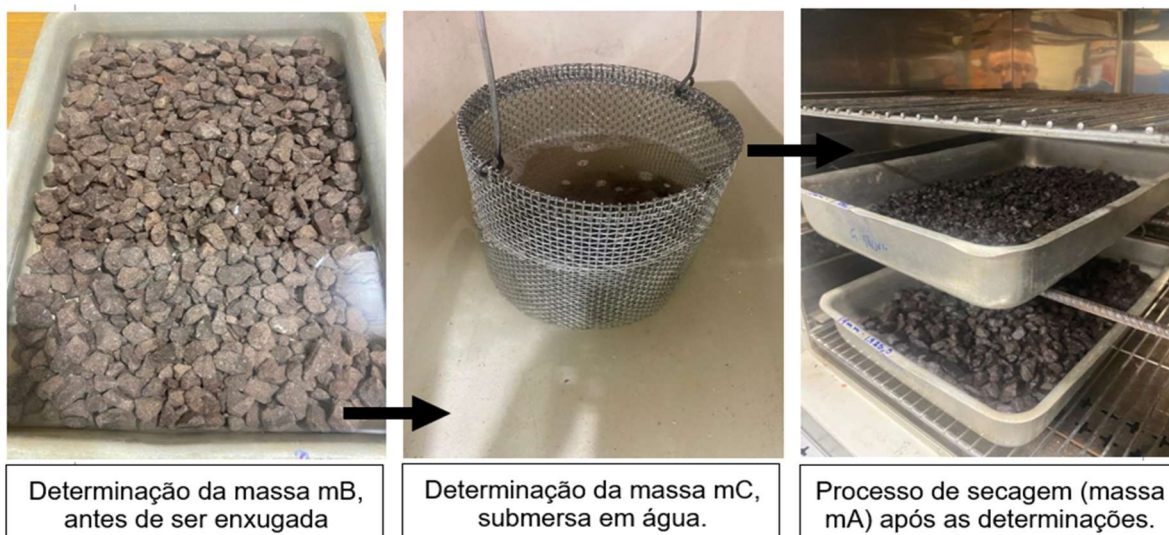


Fonte: Autor, 2024.

### 3.2.2. Caracterização dos agregados graúdos

No estudo, foram incorporados dois tipos de britas, de origens basálticas, com diâmetros máximos entre 9,5mm e 19,0mm. A caracterização da curva granulométrica e da determinação da massa específica, foi realizada conforme as recomendações da NBR 17054:2022 e NBR 16917:2021.

**Figura 10 – Ensaio da determinação da massa específica do agregado graúdo 19,00mm**



Fonte: Autor, 2024.

A realização do ensaio de acordo com a NBR 16917:2021 foi determinando as massas em cada etapa do ensaio. Inicialmente, separado e lavado sob a peneira de #4,75mm com a massa mínima para cada diâmetro máximo, após, o agregado foi saturado em água, durante as 24 horas iniciais. A 24 horas seguintes, o agregado teve sua superfície seca, para determinação da massa da amostra na condição saturada superfície seca (mB). A determinação da massa mC como massa da amostra submersa em água, foi determinada com auxílio de um cesto de arame imerso em água. Por fim, a amostra foi seca, em estufa durante um período de 24 horas, a uma temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  e determinada a massa mA da amostra.

As determinações foram igualmente iguais para o agregado de 19,00mm e 9,50mm, e a temperatura do laboratório durante os ensaios variou entre  $27^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.3. Caracterização do tipo de cimento

O cimento escolhido para realização e utilização nas dosagens experimentais foi o CPV ARI RS, de maneira comum dos cimentos comercializados no mercado, o cimento CPV ARI tem a principal característica pelo início de pega mais rápido, devido

ao seu alto calor de hidratação e composição, pela sua baixa porcentagem de adição na moagem, bem como a moagem mais fina permanecendo por mais tempo no moinho, porém o clínquer é o mesmo utilizado para a fabricação dos cimentos intermediários como CPII e os cimentos pozolânicos como CPIV.

Proveniente da cimenteira Intercement, localizada na cidade de Nova Santa Rita, no Rio Grande do Sul, os parâmetros físicos, químicos, mecânicos, e toda a sua caracterização, foram disponibilizados pela própria empresa Intercement, disponível em anexo 1. Também, atendendo as normativas brasileiras pela NBR NM 23:2017

A coleta da amostra destinada para utilização em laboratório, foi realizada seguindo as recomendações da NBR 5741:2019, realizada a coleta do cimento a granel, utilizando recipientes de capacidade de 30kg. Foi realizado a mistura total da amostra composta pelos recipientes, garantindo uma amostra mais homogênea, embaladas em sacos plásticos, identificadas com o tipo, data e local da coleta, após o transporte até o laboratório onde permaneceram sem contato com a umidade.

Os parâmetros qualitativos foram seguindo as exigências pela NBR 16697:2018.

### **3.2.3.1. Determinação da resistência a compressão**

Segundo a NBR 7215:2019, a determinação da resistência a compressão do cimento em corpos de prova cilíndricos, deve ser realizada em laboratório, o procedimento consiste em preparar os moldes (untar), antes de iniciar a preparação da massa, em seguida, a realização das misturas a realizadas são indicadas na Tabela 3 – Quantidade de Materiais, da norma, pelo item 3.5.2.1.

São necessários quatro corpos de prova necessários para a determinação em três idades, sendo necessário a realização de duas ou mais misturas no misturador. A mistura deve ser realizada colocando a quantia total de água, e logo após a adição de toda a porção do cimento, com o misturador em rotação baixa, iniciando a contagem pelo cronometro de 30 segundos. Após essa etapa, deve ser realizada as adições das areias, sendo das quatro frações, misturadas anteriormente, seguindo uma janela de 30 s para a adição de toda porção de areia. Com a adição de todo material deve ser seguida uma série de tempos de mistura, tempo de repouso e mistura final.

A moldagem dos corpos de prova deve ser realizada imediatamente após a mistura, sendo realizada em quatro camadas de alturas iguais e com o auxílio de um soquete (item 3.3.4), realizado o adensamento da argamassa nos moldes.

Os corpos de prova moldados, devem ser colocados em câmara úmida, ainda nos moldes, permanecendo por até 24h. Os corpos de prova destinados a determinação da resistência inicial em 24 horas podem ser desformados e o restante dos moldes, submersos em tanques de cura, onde devem permanecer até o ensaio.

No anexo 4, também traz os resultados dos tempos de pega pela NBR 16607:2018, a determinação da finura da amostra, pela NBR 11579:2013 e as exigências químicas (%) como perda ao fogo pela NBR 17086:2023.

#### **3.2.4. Caracterização das adições**

No total, foram duas adições escolhidas para serem incorporadas na metodologia das curvas de dosagem, ambas têm origem no próprio estado do Rio Grande do Sul, e optou-se pela disponibilidade de logística, relação custo x benefício dos materiais e suas propriedades químicas e físicas e resultados esperados nos estados frescos e endurecidos do concreto.

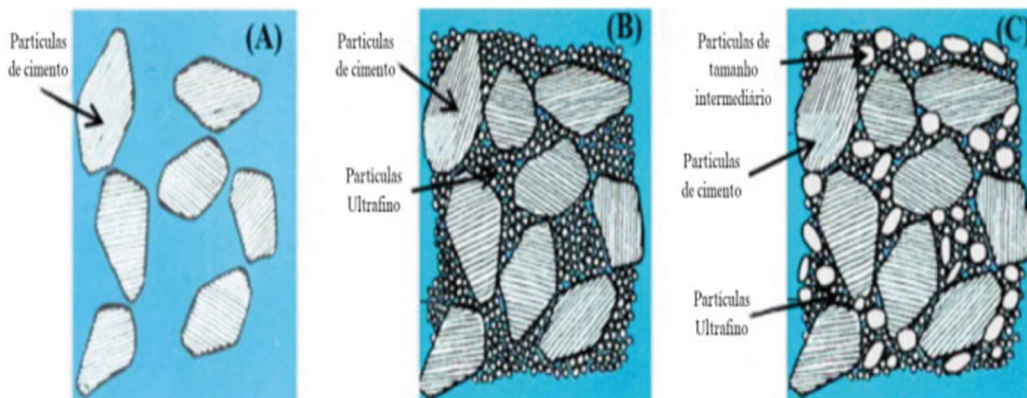
Podemos descrever a incorporação de adições com base características do cimento disponível e estudos prévios, realizados a partir do método de Vicat (VICAT, 1817) onde podemos quantificar as porcentagens reagentes nas curvas de dosagens, pois, as reações de hidratação dos cimentos, especificamente, os tempos de pega, devido as reações entre aluminato tri cálcico (C3A) e o gesso ( $\text{CaSo}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ) podem ser afetadas por essas adições, bem como os compostos que se hidratam de forma mais rapidamente como aluminato de cálcio (C3S) e aluminato tri cálcico (C3A), resultando em uma evolução mais prolongada da resistência no concreto.

##### **3.2.4.1. POZOMIX DURABILITY 7510**

A primeira adição, proveniente de beneficiamento de uma cinza pozolânica, denominada comercialmente de POZOMIX DURABILITY 7510.

A produção do material é realizada por meio da combinação de adições pozolânicas e ativadores hidráulicos com baixa geração de CO<sub>2</sub> que se traduz em uma microestrutura resultando em uma adição altamente reativa, podendo ser classificada como uma adição pozolânica de alta reatividade, da empresa HIPERMIX, no estado do Rio Grande do Sul.

**Figura 11 - Diagrama do Efeito de Empacotamento de Partículas**



Fonte: Ficha técnica pozomix durability 7510.

Nos estudos realizados, observou-se que a substituição de 30% do cimento de referência por POZOMIX DURABILITY 7510, melhora significativamente a resistência à compressão axial em diferentes idades, demonstrando um aumento na resistência mecânica e flexão, além de uma redução na permeabilidade do concreto, tornando-o menos suscetível a infiltrações e corrosão.

A utilização do POZOMIX DURABILITY 7510, um aditivo pozolânica de alta reatividade, está em conformidade com a norma brasileira NBR 12655, que regulamenta o preparo, controle, recebimento e aceitação do concreto de cimento Portland.

A escolha deste material foi realizada devido a sua alta reatividade, e finura, podendo resultar em valores baixíssimos do blaine do material, visando reduzir inicialmente os consumos de água quando adicionado em dosagens altas no estado fresco e, maiores ganhos de resistência a partir dos 28 dias de idade.

Os ensaios da determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar pela NBR 16372:2015 (método de Blaine) será utilizado como parâmetro no desenvolvimento da metodologia.

Os relatórios de ensaios físicos como da massa específica de acordo com a NBR NM 23:2017, já os requisitos e as propriedades químicas juntamente com os limites permitidos pela NBR 12653:2014 foram disponibilizados pela própria empresa, disponíveis no anexo 2.

#### **3.2.4.2. Filler calcário (AG200)**

O filler calcário utilizado nos estudos nas dosagens dos traços experimentais, é de origem dolomítica, disponibilizada pela empresa Pro Solo, material que é amplamente utilizado na agricultura para preparo do solo na região central do estado do Rio Grande do Sul e pela sua alta produtividade e pela grande disponibilidade na região.

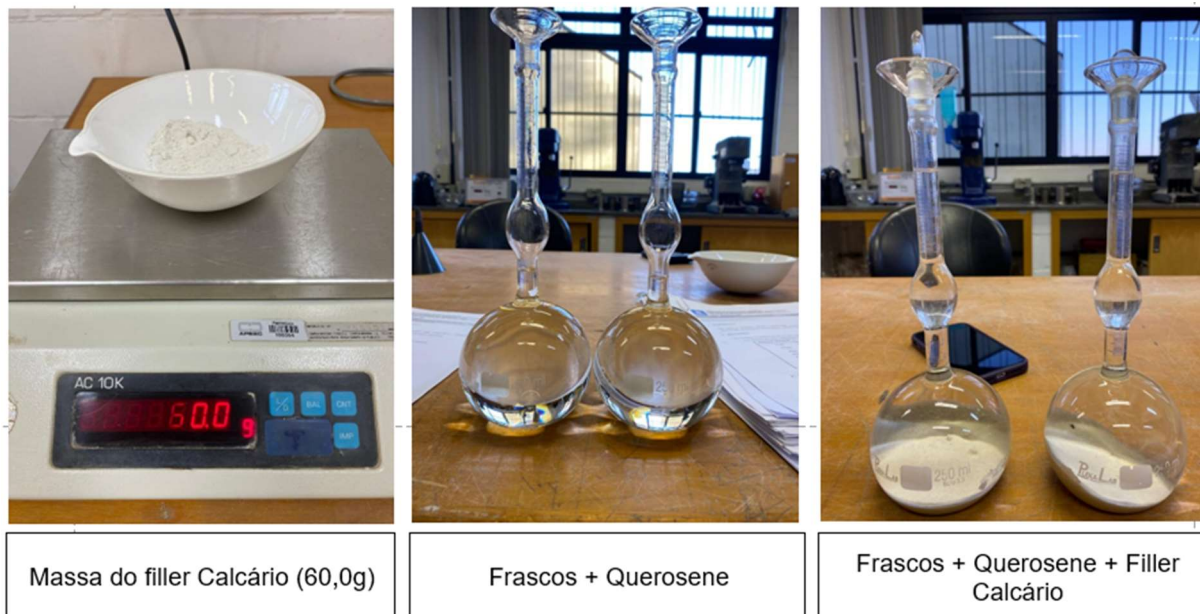
Ao tratarmos de reduções do cimento Portland nas dosagens de concreto, uma das principais características notadas nos estudos, é a dificuldade de atingir resistências maiores de 60% nas idades iniciais. Com base nisso e nas propriedades químicas do calcário, a incorporação em dosagens mesmo que baixas, influenciam no processo de hidratação e nos tempos de pega do concreto. Com isso, entende-se que, mantendo a curva de resistência dos cimentos, o teor de substituição pode ser incrementado linearmente, ou seja, a partir do momento em que garantimos as resistências iniciais, é possível uma substituição análoga entre o cimento Portland e as adições como filler calcário.

A escolha do material também é resultado das propriedades químicas do agregado. Por possuir 29,6% de CaO (óxido de cálcio) em sua estrutura química, reduzindo as taxas de evaporação da água após a mistura, contribuindo para uma redução a tendência a micro fissurações plásticas, proporcionando uma maior resistência a compressão axial, assim como a redução da demanda de água, redução da exsudação por conta da finura do material. Outro ponto importante, é o aumento dos tempos de pega, ao incrementar a mistura do filler calcário, alterando a reatividade de reações de hidratação.

A NBR 16697:2018 regulamenta a classificação e especificações do filler, como um material carbonático. Análise química do material carbonático, conforme métodos da norma NBR 6473:2003 e seus resultados dos ensaios estão dispostos no anexo 01 e os ensaios físicos referentes a disposição granulométrica seguindo as

recomendações da NBR 11579:2012 do filler calcário estão dispostos no anexo 2, juntamente com a quantia do material passante pela peneira de diâmetro #200.

**Figura 12 – Ensaio da Massa Especifica do Filler Calcário**



Fonte: Autor, 2024.

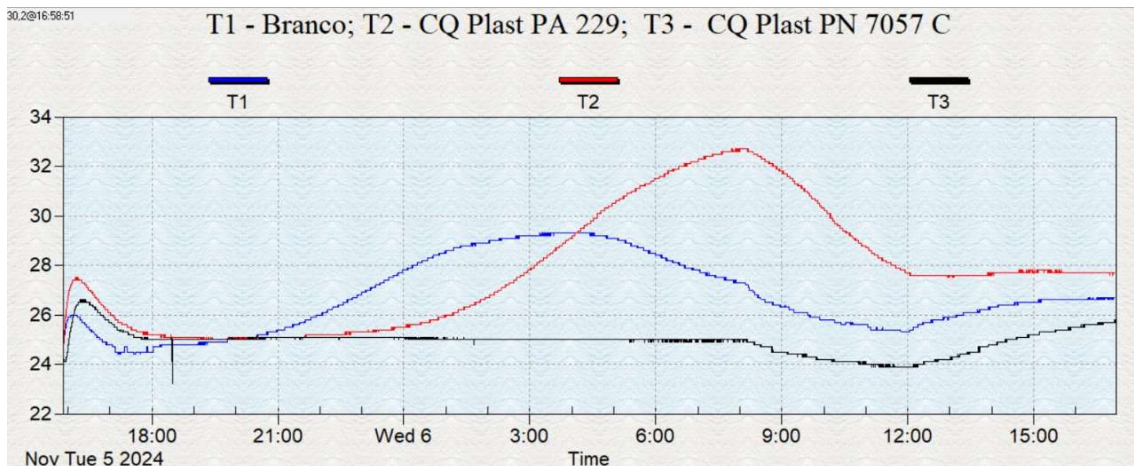
O parâmetro físico necessário para classificar a adição na metodologia deste trabalho, como massa específica foi determinada pelo método da picnometria, em três ensaios consecutivos. E seguindo os procedimentos de acordo com a NBR 16605:2017.

### 3.2.5. Aditivos

A escolha dos aditivos incorporados no estudo, foi visando a compatibilidade entre as linhas químicas e os materiais cimentícios, compostos nas misturas. Inicialmente os dois aditivos escolhidos e utilizados foram fornecidos pela empresa Camargo Química, de Santa Catarina, enviados ao laboratório como amostras de testes. Eles são classificados pela NBR 11768:2019 (Requisitos) como redutores de água RA1, ou comercialmente denominados como plastificantes, que pertencem ao grupo dos polifuncionais, que garantem duas ou mais modificações na incorporação do concreto.

A dosagem foi determinada a partir da calorimetria realizadas previamente e com base nas predisposições esperadas pelas reações dos mesmos, como redução de água, tempo de abatimento, e resistências iniciais.

**Gráfico 2 – Calorimetria dos aditivos**



Fonte: Ensaio realizado em laboratório, fabrica da Camargo Química, 2024.

Podemos observar que, o aditivo PA229 apresentou maiores temperaturas quando comparado com o próprio cimento puro (T1 – Branco), ocasionando um pico mais elevado de início de pega. Já o aditivo PN 7057C apresentou uma janela de manutenção uniforme no decorrer do ensaio.

### 3.3. Escolha dos parâmetros iniciais do concreto

#### 3.3.1. ETAPA 1 – Resistência FCJ

Devendo atender aos critérios normativos, a resistência da dosagem deve atender as variabilidades durante sua reprodução, desvio considerado entre produção na central e avaliação em laboratório, sendo definida pelo desvio padrão, em função das condições de preparo do concreto. Inicialmente, seguindo os preceitos da NBR 12655:2015 e o mesmo expressado por Rodrigues, (1983) ao que se refere a resistência estimada em "J" dias, pela seguinte equação 6 abaixo:

#### Equação 6 – Resistência FCJ

$$FCMJ = fck + 1,65 \cdot SD \quad (06)$$

Onde:

Fcmj é a resistência média de dosagem a compressão prevista na idade J em dias, expressa em MPa;

Fck é a resistência característica desejada do concreto em J dias, expressa em MPa;

SD é o desvio padrão da dosagem, expresso em MPa; determinado a partir das condições de preparo do concreto, descrito na tabela abaixo:

**Tabela 7 – Condições de Preparo do Concreto**

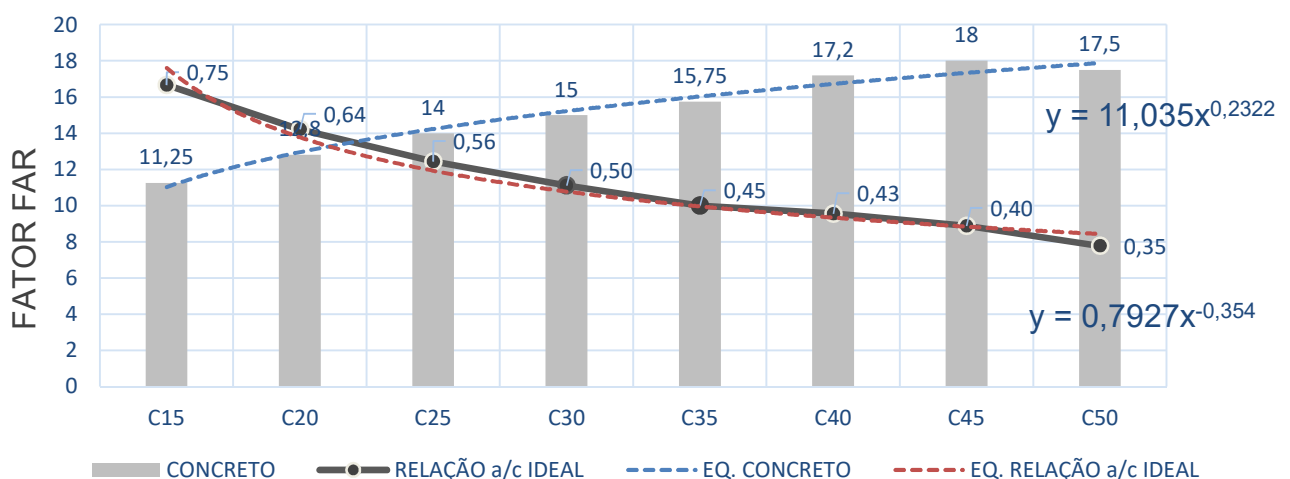
CONDIÇÕES DE PREPARO DO CONCRETO	DESVIO PADRÃO (Mpa)
<b>A</b>	4,0
<b>B</b>	5,5
<b>C</b>	7,0

Fonte: Adaptada da NBR 12655 (2015, p.17)

### 3.3.2. ETAPA 2 - Determinação do fator água x resistência

A partir da determinação da resistência média de dosagem, foi determinado um fator água x resistência, que é dada a partir da proporção da resistência FCJ (equação 05) e a curva de Abrams (Lei de ABRAMS, 1932), que chamamos de relação A/C ideal para a estimativa de resistência desejada, dada pela seguinte equação 07, expressa por um valor adimensional:

**Gráfico 3 – Dedução da EQ. 07**



Fonte: Autor, 2024.

### Equação 7 – Fator Água x Resistência (FAR)

$$\text{fator FAR} = \text{relação } \frac{a}{c} (\text{Ideal}) \times FCK \quad (07)$$

O gráfico deduzido da fórmula aponta que, ao incrementarmos uma resistência maior na mistura, a proporção resultante do fator será maior, pois o consumo de água tende a ser menor, comparado a relação a/c ideal definida por Duff (1932).

O fator água x resistência virá a se tornar por sua vez um denominador, na primeira estimativa de água da mistura, pois, sabemos que, esse fator tem como princípio a minoração dos consumos de água demandados para um determinado abatimento, que foi fixado entre 80 mm e 120 mm.

#### 3.3.3. ETAPA 3 - Primeira estimativa do consumo de água

Com base nos estudos citados, o primeiro parâmetro adotado para determinar estimativa de água, no experimento, foi definido como o fator de consumo de água inicial, apresentado pela equação 08, levando em consideração o fator água x resistência (equação 07) determinado anteriormente e a resistência requerida (fck), juntamente com a relação entre a resistência fcj, considerando que, para a resistência fcj, temos uma relação com o fator água x resistência, uma vez que esse fator é responsável por majorar a resistência prevista, com a relação água/cimento, tendo em vista que a resistência é proporcional ao consumo de água, resultando em um valor considerado denominador na estimativa de água inicial.

### Equação 8 – Fator de Consumo de Água (CAG)

$$\text{fator CAG} = \frac{\left( \left( \frac{FCJ}{\text{fator FAR}} \right) \cdot 100 \right)}{G} \quad (08)$$

Onde:

FCJ Resistencia a compressão característica (NBR 12655:2015), expressa em MPa;

Fator FAR determinado pela equação 07.

G descrito pela tabela 01 abaixo:

Portanto, a estimativa da quantia de água será realizada em duas etapas, a primeira, fazendo uma analogia com os trabalhos de Abrams em “Design of Concrete Mixture” e Taylor (1925) onde pesquisas realizadas por eles demonstravam que a resistência à compressão do concreto é inversamente proporcional à relação água/cimento, ou seja, podemos considerar que a quantia de água necessária para uma determinada resistência a compressão é atrelada ligeiramente a quantia de cimento na mistura.

O fator G foi definido pela majoração da resistência requerida ( $f_{ck}$ ), pois por se tratar de um método empírico, segunda a NBR 7212:2021 a escolha das curvas de dosagem pode ser escolhida dentro dos limites estabelecidos, dos resultados coletados em laboratório pelos corpos de prova, sendo necessário o desenvolvimento da curva de traço em laboratório previamente.

**Tabela 8 – Valor de G**

<b>Fator FAR</b>	<b>G</b>
10,0 < <b>FAR</b> > 13,9	1,300
14,0 < <b>FAR</b> > 14,9	1,260
15,0 < <b>FAR</b> > 15,5	1,200
15,6 < <b>FAR</b> > 17,1	1,180
17,2 < <b>FAR</b> > 19,9	1,165

Fonte: Autor, 2024.

#### **3.3.4. ETAPA 4 - Determinação do consumo de aglomerante**

Para a determinação do consumo de aglomerante, foi realizada uma estimativa de aglomerante otimizada em relação aos métodos estudados anteriormente no Brasil, a partir de coleta de dados em ensaios realizados, para as curvas de dosagens. Porém, com foco na pegada sustentável da redução da emissão de carbono, busca sustentabilidade e atendendo as definições para as classes de agressividades.

Portanto, a primeira estimativa do consumo de aglomerante é sustentada em função da relação água/cimento ideal estimada a partir da curva de Abrams, com o fator do consumo de água, dada pela equação 09 abaixo:

### Equação 9 – Fator Aglomerante (AGE)

$$fator\ AGE = \frac{fator\ CAG \cdot \left(1 + relação\ \frac{a}{c}\ Ideal\right)}{100} \quad (09)$$

#### 3.3.5. ETAPA 5 - Determinação do consumo de adição

Inicialmente, no experimento após realizados os ensaios de caracterização das adições, a porcentagem inicial foi definida por um fator que leva em consideração o índice de finura do material e a resistência  $f_{cJ}$ , dada pela equação 10, abaixo:

### Equação 10 – Fator Filler (%)

$$fator\ FÍLER = \left( \left( \frac{índice\ de\ finura}{resistência\ FCJ} \right) \cdot 1000 \right) \cdot (fator\ AGE \cdot resist.\ do\ cimento^{(-4)})$$

(10)

Onde:

Índice de finura definido em NBR 11579: 2012;

Resistência FCJ é a resistência média a compressão (NBR 12655:2022), expressa em MPa;

Resistência do cimento definida em NBR 7215:2015, expressa em MPa.

Diferente das aplicações usuais, onde comumente aplicamos dosagens iguais para as curvas de dosagem, no presente estudo, os consumos da adição pozolânica foi inversamente proporcional ao consumo de cimento e pela característica do material. Portanto, quanto maior o índice de finura da adição, proveniente de algum beneficiamento ou processo natural, seja de origem pozolânicos, escória de alto forno, calcário e cinzas volantes, maiores serão as adições na mistura, que será proporcionalmente inversa a resistências estimadas das curvas de dosagem e menor será o consumo de cimento, e conseqüentemente, terá o menor consumo de água total na mistura, considerando que o consumo de água depende da quantia de cimento, quanto maior a quantia de aglomerante na mistura, a partir de um ponto de saturação das porosidades menor será o consumo de água. (DE LARRARD; SEDRAN, 2002a)

### 3.3.6. ETAPA 6 – Consumo de cimento

O consumo inicial de cimento, foi estimado levando em consideração o resultado do fator filler (equação 10) comportado dentro da mistura, buscando uma incorporação que resulte em uma melhor reatividade com o cimento. A quantia de cimento “excedente” inicial como sendo de baixa hidratação na mistura (equação 09) e a adição mínima de dada pela equação 10, descritas abaixo:

#### **Equação 11 – Adição de Cimento Excedente Inicial**

$$AEi = \text{fator Aglomerante} \cdot \text{fator H} \quad (11)$$

#### **Equação 12 – Adição Mínima de Cimento Final**

$$AMCf = AEi - \text{fator AGE} \quad (12)$$

Onde:

*AEi* Quantia de cimento excedente, de baixa hidratação, em quilogramas;

*AMCf* Quantia de adição mínima de cimento, em quilogramas.

O fator H é apresentado pela tabela 9, avaliando os dados referenciados anteriormente, onde, estimando uma proporção onde conhecendo o montante de aglomerante total na mistura, e correlacionando com a relação a/c proposta por Abrams em 1912, o fator é deduzido pelas equações abaixo:

#### **Equação 13 – Água Mínima**

$$H_2O \text{ (mínima)} = 0,225 \times C \quad (13)$$

#### **Equação 14 – Água Máxima**

$$H_2O \text{ (máxima)} = 0,300 \times C \quad (14)$$

#### **Relação 02 – Proporção de H<sup>2</sup>O**

$$0,225 \cdot C \leq H_2O \leq 0,300 \cdot C \quad (02)$$

Resultando em um consumo médio de 0,250kg de água para cada 1,0kg de cimento. Portanto, a minoração dos consumos de aglomerante resulta em uma

quantia chamada de quantia ideal para hidratação, ou, quantia de cimento hidratado corretamente na mistura.

A partir dessa relação e para determinar as quantidades necessária e suficientes para hidratar corretamente o cimento foram realizadas as seguintes simplificações:

#### **Equação 15 – Quantia Necessária de Água**

$$H_2O = \left( \frac{H_2O \text{ (mínima)} + H_2O \text{ (máxima)}}{2} \right) \times C \quad (15)$$

Para calcular a variação da quantidade de água necessária em relação à quantidade de material, utilizamos a derivada dessa função com respeito ao cimento (C):

#### **Equação 16 – Taxa de Variação da Quantia de Água**

$$\frac{dy}{dx} = \left( \frac{H_2O \text{ (mínima)} + H_2O \text{ (máxima)}}{2} \right) \quad (16)$$

Esta derivada indica a taxa de variação da quantidade de água necessária para hidratar o material quando a quantidade de cimento (C) varia. Ou, mostra quanto a quantidade de água necessária muda para cada unidade adicional de material.

**Tabela 9 – Fator H**

<b>FATOR H</b>	
<b>C20</b>	0,3000
<b>C25</b>	0,2875
<b>C30</b>	0,2750
<b>C35</b>	0,2625
<b>C40</b>	0,2500
<b>C45</b>	0,2375
<b>C50</b>	0,2250

Fonte: Autor, 2024.

Portanto, a minoração dos consumos de aglomerante resulta em uma quantia otimizada, onde podemos descrever que, o menor consumo de água na mistura, e suficiente para a hidratação do cimento terá então o melhor desempenho mecânico.

Com a coleta dos consumos da adição, e da minoração do consumo de cimento, deve-se verificar ao requisito abaixo:

### **Relação 3 – Verificação dos Consumos Cimentícios**

$$\text{fator FILLER} + \text{AMCf} \leq \text{fator AGE} \quad (03)$$

#### **3.3.7. ETAPA 7 – Determinação da quantia de agregado graúdo**

A metodologia aplicada neste estudo traz as referências anteriores aplicadas a uma estimativa inicial, afim de proporcionar uma quantia de agregado graúdo na mistura otimizada, para misturas que dependem de teores de argamassa maiores para uma determinada trabalhabilidade e reologia, resultando em uma área de contato maior para uma redução na quantia de água e consumo de pasta, e proporcional para misturas com teores menores, mantendo assim, a coesão para as dosagens mais pobres de pasta de cimento, que necessitam de uma redução no consumo de água mas também necessitam de uma trabalhabilidade adequada para que o lançamento desde concreto aja de forma adequada.

Seguindo os estudos de Vallete (1947) no entendimento dos teores de argamassa (%) necessários para atingir uma determinada trabalhabilidade e manter a coesão na mistura e homogeneidade, são previstos os valores (tabela 10) por meio da correlação do teor de argamassa desejado, e o consumo de aglomerante.

#### **Equação 17 – Determinação do consumo de agregado graúdo**

$$AGR = \frac{\text{fator AGE} \cdot \left(1 + \frac{A}{C}\right)}{H\% \cdot AG\%} \quad (17)$$

Onde o fator AGR, expresso em kg, representa o consumo de aglomerante graúdo, que posteriormente será levado a determinações individuais da porcentagem de cada diâmetro. Os fatores H% são apresentados pela tabela 10 e AG% são expressos tabela 11.

**Tabela 10 – Proporções de agregado graúdo total**

<b>TEOR DE ARGAMASSA (%)</b>	H%
	<b>Ø DO AGREGADO (mm)</b>
	19,0 (%)
50,0	0,299
51,0	0,306
52,0	0,312
53,0	0,319
54,0	0,326
55,0	0,334
56,0	0,342
57,0	0,350

Fonte: Autor, 2024.

**Tabela 11 – Proporções de aglomerante / agregado graúdo**

<b>CONSUMO DE AGLOMERANTE (kg)</b>	
<b>CONSUMO NA MISTURA (kg)</b>	<b>AG%</b>
234:245	0,783
246:257	0,766
258:269	0,749
270:281	0,732
282:293	0,716
294:305	0,699
306:317	0,671
318:329	0,687

Fonte: Autor, 2024.

Também, ao aumentamos o teor de materiais cimentícios de mistura, ou seja, em concretos com relações maiores em consumo de cimento, a qualidade da pasta aumenta, logo obtemos valores de retração, calor de hidratação maiores, obtendo valores de 40% a 80% um aumento na resistência (NEVILLE, 1997) desta maneira este fator leva em conta, que, quanto maior o teor de argamassa estabelecido, podemos ter consumos maiores de agregado graúdo com diâmetros maiores, pois a

quantia de matérias finos, tende a ter uma capacidade maior de cobertura desse agregado graúdo e empacotamento dos grãos, fato alinhado na relação da quantia de aglomerante e a relação água / cimento. (KAPLAN, 1989)

Após a realização da composição granulométrica e na caracterização inicial, foi realizada a primeira estimativa da mescla dentre os dois materiais, aplicando os valores recomendados pela NBR 17054:2022 e os estudos das curvas ideais de Fuller (gráfico 2) aplicados ao gráfico de zonas mínimas e zonas máximas, imagem abaixo:

#### **Equação 18 - % 19,0mm**

$$\% 19,0mm = \frac{MF\ Ideal}{MF\ (19,0mm)} \times média\ MF \quad (18)$$

#### **Equação 19 – % 9,5mm**

$$\% 9,5\ mm = 1 - \%19,0mm \quad (19)$$

### **3.3.8. ETAPA 8 –Determinação da quantia de agregado miúdo**

O método experimental deste trabalho, trata os agregados miúdos de forma compensatória dentro do cálculo do volume (m<sup>3</sup>) da mistura, sendo que sua quantidade em volume (L), é definida de forma unívoca, após as estimativas realizadas pelos outros materiais, descritos anteriormente neste trabalho. Entretanto, a sua mescla, ou sua porcentagem individual, quando trabalhado com dois tipos de agregados miúdos, dentro dos próprios conceitos de agregado miúdo, parâmetros que foram inicialmente definidos pelos estudos de Fuller (1907).

Derivado da seção 7.4.2 da NBR 6118:2023, e seção 5.2.2.2 da NBR 12655:2022 que tratam da composição do concreto para cobrimento das armaduras, teor máximo de íons de cloreto (Cl<sup>-</sup>), das classes de agressividades e dos cuidados com a vida útil das estruturas, onde delimitam valores de a/c para condições de exposição mais agressivas, e com isso, temos o teor de argamassa um dos fatores que influenciam na aceleração de escoamento dos íons de cloreto (Cl<sup>-</sup>) nas estruturas (RIBEIRO, 2018).

A mescla de areia, a estimativa volumétrica da quantia total de agregado miúdo, são classificadas em das etapas: volume de agregado miúdo (AGRM) e a mescla final na utilização de duas areias. O volume inicial de areia pode ser definido pela tabela abaixo:

### **Equação 20 – Quantia de agregado miúdo**

$$AGRM = (1000 \times 2,0\%) - AMCF - AD.Principal - \acute{A}gua - AGR \quad (20)$$

Após a determinação da quantia total de agregado miúdo, foi considerado que, ao aumentarmos o incremento de cimento na mistura, os índices de vazios tendem a serem reduzidos, fazendo com que a demanda necessária de areia de granulometria menor seja reduzida, em relação a granulometria do agregado miúdo com módulo de finura superior. A estimativa final da mescla do agregado miúdo é dada pelas equações abaixo:

### **Equação 21 – Volume corrigido da areia média**

$$AREIA\ 01 = \left( \frac{\text{Volume da Areia 01}}{\frac{\text{Aglomerante}}{100} - 1} \right) \quad (21)$$

### **Equação 22 – Volume corrigido da areia grossa**

$$AREIA\ 02 = AGRM - AREIA\ 1 \quad (22)$$

## **3.4. Procedimentos realizados no canteiro**

Após a caracterização física dos materiais, determinações das massas específicas, curvas granulométricas e a resolução dos traços em massa, todos os materiais foram submetidos ao processo de secagem em estufas, permanecendo por no mínimo 24 horas a temperaturas de 110°C±5°C, afim de garantir que todos os materiais fossem secos, sem necessidade de correções por umidade, logo após, a estabilização da temperatura dos materiais ocorreu de acordo com a NBR 12655:2022 permanecendo por um período mínimo de 24 horas antes da mistura do concreto.

Os procedimentos adotados para o preparo do concreto, e pesagem dos agregados foram realizados de acordo com a NBR 12821:2009 e suas especificações.

### **3.4.1. Pesagem e preparo dos materiais**

Cada material, foi pesado individualmente em recipientes tarados, com capacidades de 20,0 litros ou de 40,0 quilogramas, com auxílio de uma balança com precisão de 0,01g. O processo de pesagem seguiu uma ordem específica: primeiro os

agregados graúdos, seguidos do cimento, agregados miúdos, por fim, a água e os aditivos. Em recipientes individuais, identificados, e depois realizado a pré mistura dentro dos recipientes, para facilitar na adição dentro da betoneira.

#### **3.4.2. Procedimento de mistura:**

A betoneira utilizada, com eixo inclinado, e giro do tambor em 180°, apta a misturas de concreto até um volume de 120,0 litros (capacidade máxima). Já o volume de concreto preparado foi 15,0 litros, capaz de suprir em 10% a quantia necessária para moldagens dos corpos de prova e dos ensaios de abatimento.

Em seguida, os agregados foram umedecidos antes da mistura para garantir uma homogeneidade adequada e evitar a perda de água do cimento. Na sequência de colocação dos materiais, inicialmente, adicionou-se o agregado graúdo e parte da água de amassamento (aproximadamente 40% do volume de água total), acionando a betoneira durante aproximadamente 30 segundos. Em seguida, adicionou-se o cimento e mais aproximadamente 30% do volume da água, acionando a betoneira por cerca de 30 segundos. Após, adicionou-se os aditivos, previamente misturados em um recipiente, diluídos em água, para que ocorresse a maior distribuição possível no concreto e dentro da betoneira. Por fim, adicionou-se o agregado miúdo e o restante da água, acionando a betoneira pelo tempo necessário para garantir a homogeneidade e a trabalhabilidade do concreto. Importante destacar que todos os materiais estavam na condição seca, sem a necessidade de correções de umidade.

#### **3.4.3. Cortes de água iniciais:**

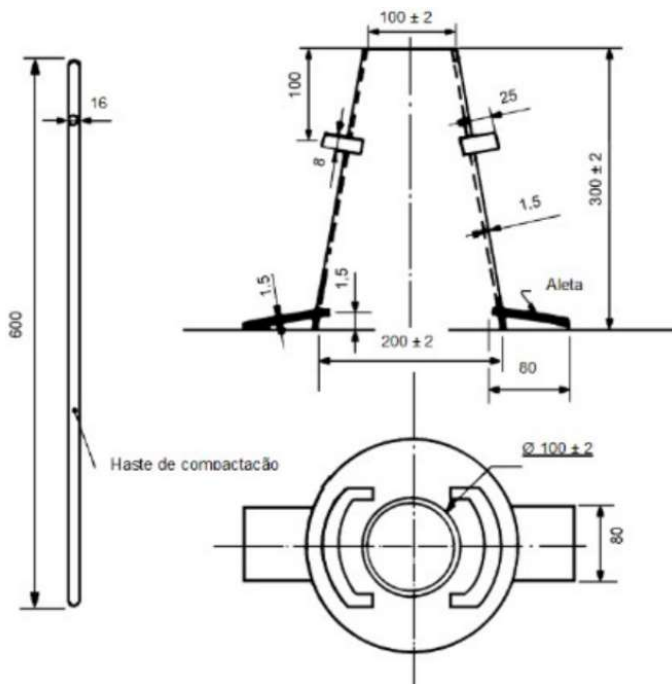
Ao longo dos ensaios, foram determinados os consumos iniciais de água, procurando manter de forma efetiva e padrão os valores iniciais dos abatimentos, antes da janela de perda de abatimento. Esses consumos iniciais de água foram denominados em consumos de água iniciais.

#### **3.4.4. Ensaio pelo tronco de cone (SLUMP TEST)**

Após a homogeneização total do concreto na betoneira, o ensaio da determinação da consistência do concreto, foi realizado de acordo com a NBR 16889:2020. Os equipamentos padrões utilizados foram o funil, haste com diâmetro de 16mm x 600mm, concha metálica de seção U, base metálica, cone de 300mm de

altura, e uma régua metálica. O ensaio consistiu na realização de três camadas de concreto, igualmente iguais de altura dentro do cone, adensando cada camada individualmente com 25 golpes, distribuídos em todas seções do cone.

**Figura 13 – EQUIPAMENTO PARA SLUMP TEST**



Fonte: NBR 16889:2020 (p. 5)

Os adensamentos em cada 1/3 de camada não podem ultrapassar a camada inferior, e na primeira sem que aja contato da haste com a base metálica. Os valores dos abatimentos iniciais foram caracterizados pela sigla **S0**

#### **3.4.5. Determinação das perdas de abatimento:**

A determinação das perdas de abatimento de cada traço de concreto, foi realizada seguindo as recomendações e determinações da NBR 10342:2012. Ambos os ensaios da metodologia experimental foram realizados no mesmo dia, e ao abrigo do sol, no canteiro, com temperatura do dia em 25°C+/-2°C e umidade em 74%.

Imediatamente após a determinação do primeiro ensaio de abatimento, foi-se anotado a leitura do primeiro ensaio, e a hora em questão, após, adicionado o concreto de volta a betoneira, e por durante 30s o concreto foi remisturado, e a tampa da betoneira coberta por um pano úmido para que não houvesse contato direto com o ar. O tempo estipulado e cronometrado com a betoneira parada após a primeira verificação foi de 20 minutos. Na etapa subsequente, após o decorrer do tempo

estipulado, a betoneira foi religada durante 1 minuto, e realizada nova verificação de abatimento, afim de verificar a diferença entre a primeira e a segunda verificação.

Os abatimentos foram determinados em **S0**, **S1** e **S2** apenas.

#### **3.4.6. Correção da relação de abatimento inicial:**

A realização das correções entre os abatimentos entre S0 e S1, respeitando a igualdade em que  $S1 < S0$ , em todos os traços, ocorreu pela adição de 0,02 kg para cada 1 cm de diferença entre eles no ensaio. O abatimento S2, é resultado da adição da água após a determinação de S1. Portanto, após a realização das perdas de abatimento, os valores dos ensaios em S2 de todos os traços foram igualmente similares, buscando a maior similaridade entre eles. Esse procedimento foi igualmente realizado para todas as misturas nas dosagens experimentais, esse ensaio foi importante para compreender e verificar como cada tipo de ponto se comporta no decorrer do tempo, pela evaporação da água, e perda de trabalhabilidade, bem como os aditivo e adições se comportariam diante dessa janela de manutenção.

Os valores de S2 foram compreendidos de acordo com o intervalo abordado no início das determinações iniciais, fixado em  $120 \pm 20$ mm como abatimentos finais e de moldagem.

#### **3.4.7. Moldagem dos corpos de prova 100x200mm:**

A moldagem dos corpos de provas cilíndricos foi realizada aplicando as especificações da NBR 5738:2016. Também a amostra de concreto seguindo o intervalo proposto pela NBR 16886:2020 da coleta na betoneira até a realização da moldagem.

Inicialmente, foram preparados os moldes, que, devem ter a relação de duas vezes o diâmetro, e tolerância de 1% para as medidas e estanque. Dispostos na bancada foram untados com óleo mineral em todo perfil lateral e fundo, após a coleta da porção de concreto na betoneira, foi realizada a moldagem do corpo de prova partindo de uma camada inicial até  $\frac{1}{2}$  da altura do molde, e realizando o adensamento manual de 12 golpes em toda área de seção, seguindo o mesmo para a segunda camada, até o topo do molde, e realizando igualmente o adensamento de 12 golpes, sem que haja transpasse de da haste para camada inferior de concreto. Por fim, foi

realizado o rasamento do topo do molde, após a última camada de concreto, afim de regularizar toda a superfície do molde.

#### **3.4.8. Massa específica e índice de ar incorporado:**

A determinação resultante do ar incorporado nas misturas foi realizada com base no método do rendimento do volume resultante das amostras adensadas, onde os moldes foram pesados, obtendo a massa (tara) e posteriormente a massa dos corpos de prova após a moldagem.

#### **3.4.9. Cura inicial e final**

Após a moldagem, os corpos de prova foram devidamente identificados ainda nos moldes, na parte superior, permanecendo imóveis pelo período das 24 horas seguintes, sem qualquer tipo de movimentação e abrigados da luz solar.

Nas 48 horas seguintes, os corpos de prova foram retirados dos moldes, identificados na lateral, e submersos em uma solução de água com cal, mantendo a temperatura constante de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  de acordo com a NBR 5738:2015 e mantidos imersos até as idades de rupturas. O tanque com a solução de água, livre da ação de corrente e protegida das ações do ambiente, e seguindo também os requisitos da NBR 9479:2016.

Os corpos de prova destinados aos ensaios de compressão aos 7, 14, 28 e 56 dias foram mantidos em nesta condição até o dia do ensaio.

#### **3.4.10. Preparo dos corpos de prova:**

As extremidades e bases dos corpos de prova destinados aos ensaios de compressão e de módulo de elasticidade, foram preparados por meio da retificação, que consiste na remoção parcial de uma leve camada de concreto nos topos dos corpos de prova por meios mecânicos com auxilia de uma retifica de corte horizontal, de corte automático, afim de garantir planicidade, e correção nas verificações pelo esquadro, garantindo assim, que toda seção transversal do corpo de prova esteja em contato com a mesa superior e inferior da prensa.

Também, foram utilizados dispositivos auxiliares de neoprene, que consiste na acomodação do corpo de prova em pratos auxiliares para acomodação dos discos de

neoprene na prensa. Os discos de neoprene atendem as especificações das normas ASTM C1231, AASHTO T851, T22.

**Figura 14 – Discos de Neoprene**

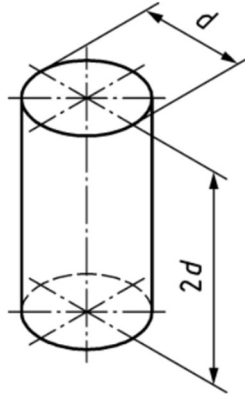


Fonte: Autor, 2024.

#### **3.4.11. Avaliação dimensional**

Antecedendo os ensaios, os corpos de prova foram medidos, e pesados. As medidas das alturas e do diâmetro dos corpos de prova com o auxílio de um paquímetro de resolução 0,1mm que influenciam de acordo com a NBR 5739:2018 nos resultados obtidos das cargas suportadas. As massas dos corpos de prova foram extraídas com auxílio de uma balança com resolução de 0,01g de precisão a fim de verificar a densidade dos corpos de prova, garantindo que todas as moldagens estivessem nas mesmas condições e conformidade entre elas. A importância da verificação das massas dos corpos de prova é um passo fundamental no processo de avaliação e controle da qualidade do concreto.

**Figura 15 – COTAS DE AVALIAÇÃO DIMENCIONAL**



Fonte: Adaptado da NP EN 12390-1 (CEN, 2003).

#### **3.4.12. Ensaio de compressão**

O rompimento a compressão dos corpos de prova, foram realizados de acordo com a NBR 5739:2018, que especifica o método de ensaio para determinar a resistência a compressão do concreto. Logo após a retirada dos corpos de prova dos tanques de cura e o preparo das faces, os mesmos foram tiveram suas faces secas, centralizados nos dispositivos auxiliares de neoprene e nas mesas superiores e inferiores da prensa, fazendo com que o eixo do corpo de prova coincida com o eixo vertical de aplicação da carga. A máquina utilizada nos ensaios é da marca Emic, modelo DL30000N.

A janela de tolerância para as idades de ruptura definidas pela metodologia, especificada pela tabela 1 da NBR 5739:2018, foram seguidas. Durante o ensaio, o carregamento foi constante, respeitando a faixa entre 0,30 até 0,50 MPa/s, sendo mantido até o momento da ruptura total do corpo de prova ou queda da carga constante. A expressão utilizada para calcular os resultados da resistência a compressão é expressa pela equação 16.

#### **Equação 23 – Cálculo da resistência a compressão**

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2}$$

Onde:

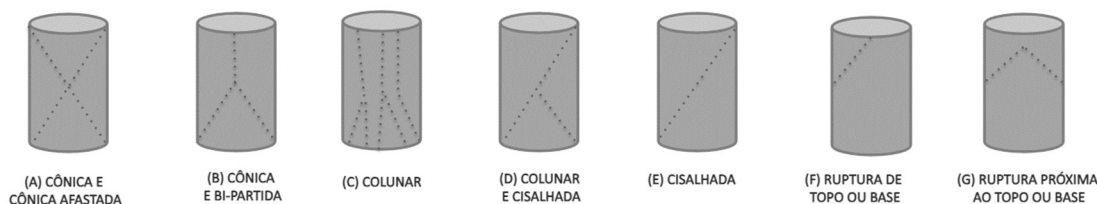
$f_c$  é a resistência a compressão, em megapascals (MPa);

$F$  é a carga (força) máxima do momento da ruptura, em newtons (N);

$D$  representa o diâmetro médio do corpo de prova, em milímetros (mm).

Após o ensaio, também, foi verificado o tipo da ruptura resultante do corpo de prova, de acordo com a figura 20, dos tipos de ruptura disponíveis no anexo A da NBR 5739:2018.

**Figura 16 – Tipos de ruptura dos corpos de prova**



Fonte: Adaptado da NBR 5739:2018 (p. 7)

É importante realizar a verificação do tipo de ruptura após o ensaio, pois a partir dele, é possível considerar ou descartar o resultado obtido, onde os tipos de ruptura “F” (ruptura de topo) e “G” (ruptura de base) podem ser considerados desvios no processo de retificação e ou preparo ou na moldagem do corpo de prova, caso aja algum tipo de discrepância entre os exemplares da mesma mistura.

#### **3.4.13. Ensaio de módulo de elasticidade:**

Os corpos de prova destinados aos ensaios do modulo de elasticidade, permaneceram nas mesmas condições de cura dos corpos de prova dos ensaios a compressão. O método utilizado para determinação do módulo de elasticidade estático, foi seguindo os parâmetros adotados pela NBR 8522-1:2021 especificado pelo anexo A (Determinação do módulo de deformação a uma tensão especificada e traçado do diagrama tensão-deformação).

Onde, após o preparo das bases foram realizadas as sequencias de carregamentos, as leituras respectivas dos intervalos considerados e traçado o diagrama de deformação x tensão.

O dispositivo utilizado foi da marca EMIC, com bases dependentes.

### 3.5. Determinação dos traços de referências

As informações dos T.U.P e dos quantitativos respectivamente em massa dos traços de referências, determinados pelos métodos da ABCP, ACI e IPT são apresentados pelas tabelas abaixo.

**Tabela 12 – Traço ABCP**

MÉTODO ABCP	TUP			
	CIMENTO	MIÚDO (AREIA)	GRAÚDO (BRITA)	RELAÇÃO A/C
	1	1,98	2,67	0,53
	MASSA (kg)			
	386,00	766,00	1030,00	205,00

Fonte: Autor, 2024.

**Tabela 13 – Traço ACI**

MÉTODO ACI	TUP			
	CIMENTO	MIÚDO (AREIA)	GRAÚDO (BRITA)	RELAÇÃO A/C
	1	1,62	2,25	0,50
	MASSA (kg)			
	434,00	702,00	977,00	217,00

Fonte: Autor, 2024.

**Tabela 14 – Traço IPT**

MÉTODO IPT	TUP			
	CIMENTO	MIÚDO (AREIA)	GRAÚDO (BRITA)	RELAÇÃO A/C
	1	1,95	2,55	0,44
	MASSA (kg)			
	406,00	790,00	1035,00	179,00

Fonte: Autor, 2024.

Buscando uma melhor compreensão entre os resultados das dosagens experimentais realizadas neste estudo, e pelos métodos ABCP, ACI e IPT mencionados acima, os teores de argamassa foram mantidos próximos de 0,53% para todas as dosagens e dosagem do aditivo RA1 em 0,8% sobre a massa de cimento em todos os traços de referência.

Também, os materiais como o tipo de cimento, areias e britas foram utilizados os mesmos, durante todo o estudo, para todos os concretos.

#### 4. RESULTADOS

##### 4.1. Resultados físicos dos agregados miúdos secos

Os resultados da caracterização dos agregados secos miúdos, tais como a curva granulométrica estão dispostos nas tabelas 15 e 16.

**Tabela 15 – Ensaio granulométrico da areia média**

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (%)		Variação das % retidas	Média das massas (%)	Massa retida acumulada (%)
	ENSAIO 1	ENSAIO 2			
12,5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
9,5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
6,3	0,3%	0,5%	0,2%	0,4%	0,4%
4,75	0,1%	0,1%	0,0%	0,1%	0,5%
2,36	2,2%	2,3%	0,1%	2,3%	2,8%
1,18	7,2%	7,7%	0,5%	7,4%	10,2%
0,6	29,3%	29,6%	0,4%	29,5%	39,7%
0,3	53,2%	52,6%	0,5%	52,9%	92,6%
0,15	7,2%	6,7%	0,5%	6,9%	99,5%
0,075	0,6%	0,4%	0,1%	0,5%	100,0%
FUNDO	0,0%	0,0%	0,0%	-	-

Fonte: Autor, 2024.

**Tabela 16 – Ensaio granulométrico areia grossa**

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (%)		Variação das % retidas	Média das massas (%)	Massa retida acumulada (%)
	ENSAIO 1	ENSAIO 2			
12,5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
9,5	0,1%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%
6,3	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%
4,75	0,2%	0,3%	0,1%	0,3%	0,5%
2,36	8,8%	9,0%	0,2%	8,9%	9,4%
1,18	30,2%	30,2%	0,0%	30,2%	39,6%
0,6	32,2%	32,2%	0,0%	32,2%	71,8%
0,3	22,3%	22,2%	0,1%	22,3%	94,1%
0,15	5,2%	5,2%	0,0%	5,2%	99,3%
0,075	0,4%	0,4%	0,0%	0,4%	99,8%
FUNDO	0,3%	0,2%	0,0%	-	-

Fonte: Autor, 2024.

Na tabela 17 são apresentados os resultados da caracterização final dos agregados miúdos, o diâmetro máximo, módulo de finura e massa específica e utilizados para conversões dos volumes nas dosagens.

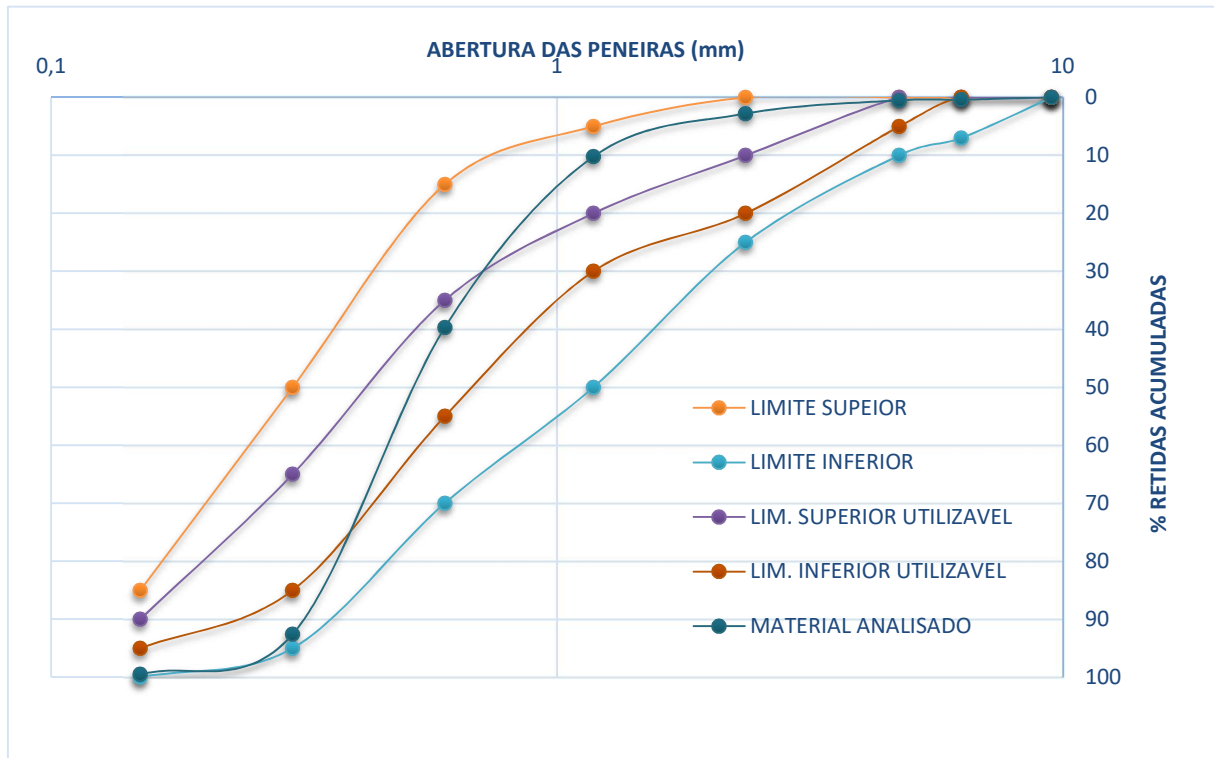
**Tabela 17 – Caracterização finais dos agregados miúdos**

Material	Φ Máximo (mm)	Módulo de Finura	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )
Areia Média	2,36	2,20	2,66
Areia Grossa	4,75	3,15	2,65

Fonte: Autor, 2024.

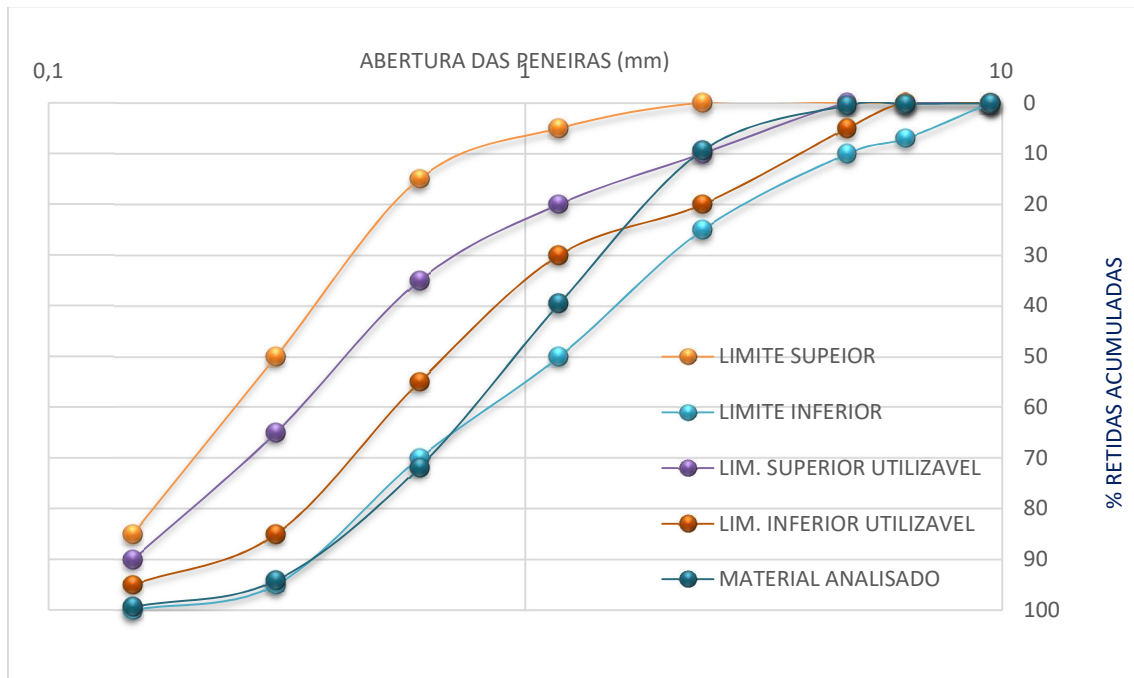
As curvas granulométricas, realizadas com base nos parâmetros e valores normativos, são apresentadas pelo gráfico 4 para areia média e para areia grossa, no gráfico 5, abaixo:

**Gráfico 4 – Curva granulométrica da areia média**



Fonte: Autor, 2024.

**Gráfico 5 – Curva granulométrica da areia grossa**

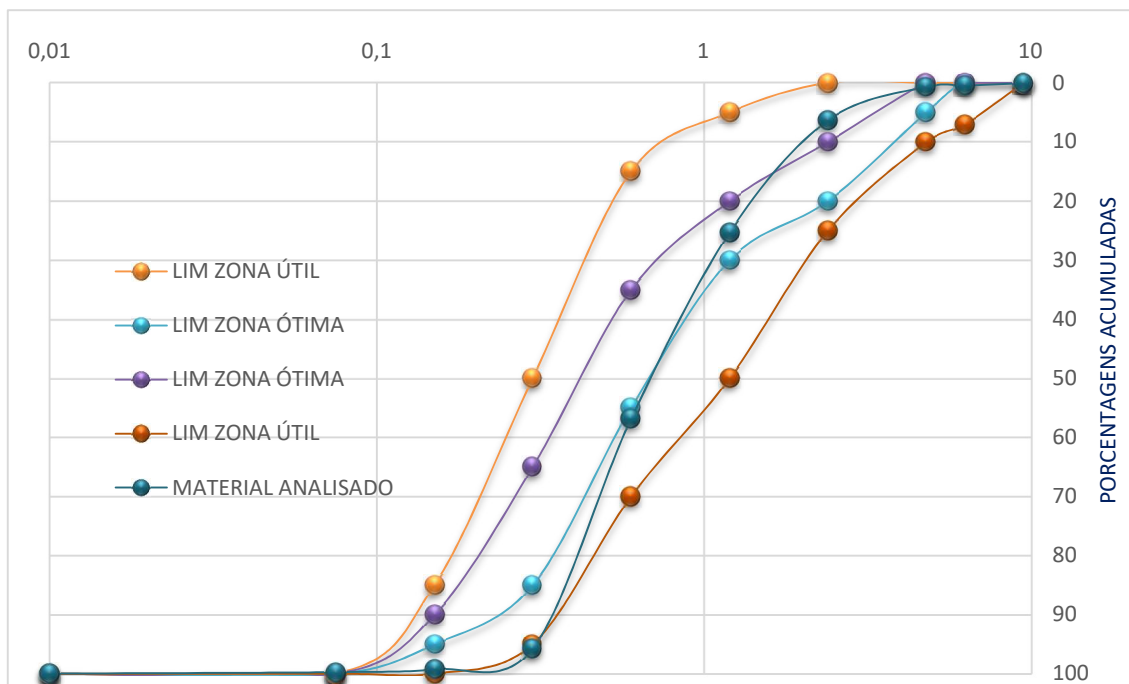


Fonte: Autor, 2024.

Com a realização dos ensaios granulométricos individuais e as características físicas dos agregados miúdos, foi possível chegar as mesclas iniciais, afim de verificar

e compensar alguma descontinuidade nas zonas de graduação de forma compatibilizada entre cada uma, e verificar o enquadramento dentro do que estabelece como recomendações limites a NBR 7211:2022 e que, será utilizada nas etapas finais da metodologia.

**Gráfico 6 – Mescla Inicial dos agregados miúdos secos**



Fonte: Autor, 2024.

A mescla inicial, apresentada pelo gráfico 6, foi determinada com uma proporção inicial de 50,0% de areia média e 50,0% de areia grossa nas composições iniciais dos traços. Considerando essa proporção, as porções nas peneiras abaixo de #0,600 o material passante foi superior ao recomendado pela zona útil limite, caracterizando um excesso de finos desta proporção.

#### 4.2. Resultados dos ensaios físicos dos agregados graúdos

Os resultados dos ensaios granulométricos nos agregados graúdos são apresentados pelas tabelas 18 e 19:

**Tabela 18 - % Material retido no ensaio na brita 19,0mm**

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (%)		Variação das % retidas	Média das massas (%)	Massa retida acumulada (%)
	ENSAIO 1	ENSAIO 2			
<b>19,0</b>	1,3%	1,0%	0,3%	1,2%	1,2%
<b>12,5</b>	80,0%	74,7%	5,7%	78,5%	78,5%
<b>9,5</b>	15,1%	19,7%	4,5%	17,4%	95,9%
<b>6,3</b>	3,3%	4,4%	1,1%	3,9%	99,8%
<b>4,75</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	99,8%
<b>2,36</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	99,8%
<b>FUNDO</b>	0,2%	0,3%	0,1%	-	-

Fonte: Autor, 2024.

**Tabela 19 - % Material retido no ensaio na brita 9,5mm**

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (%)		Variação das % retidas	Média das massas (%)	Massa retida acumulada (%)
	ENSAIO 1	ENSAIO 2			
<b>12,5</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>9,5</b>	0,3%	0,0%	0,3%	0,2%	0,2%
<b>6,3</b>	34,8%	35,5%	0,7%	35,2%	35,3%
<b>4,75</b>	43,6%	42,4%	1,2%	43,0%	78,3%
<b>2,36</b>	20,2%	21,0%	0,8%	20,6%	98,9%
<b>FUNDO</b>	1,1%	1,1%	0,0%	-	-

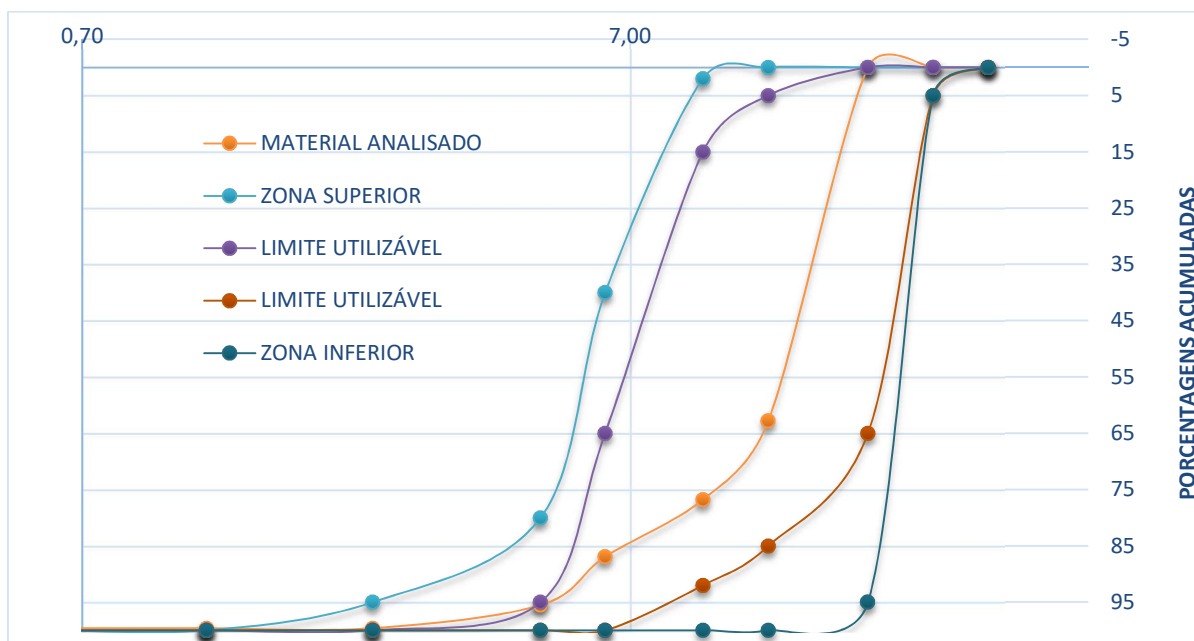
Fonte: Autor, 2024.

Como definido pela NBR 7211:2022 foi realizada uma verificação preliminar, do enquadramento dentro dos perfis ótimos dos materiais graúdos que serão incorporados nas misturas, a partir das curvas resultantes dos ensaios realizados, seguindo os gráficos abaixo:



recomendações pela tabela 6 (limites da composição granulométrica do agregado graúdo) da NBR 7211:2022.

**Gráfico 9 – Mescla inicial dos agregados graúdos**



Fonte: Autor, 2024.

O gráfico 9 apresenta a primeira estimativa da mescla dos agregados graúdos, correspondendo a uma porção de 20,0% de agregado de diâmetro 9,5mm e 80,0% de agregado com diâmetro de 19,0mm. Foi utilizando como base os valores para as dimensões máximas de 9,5mm e 19,0mm respectivamente.

Os resultados dos ensaios das características físicas dos agregados graúdos, como diâmetro máximo, módulo e massa específica estão descritos nas tabelas acima.

**Tabela 20 – Resultados dos ensaios físicos da brita 19,0mm**

Brita 19,00mm		Φ Máximo (mm)			Módulo de Finura	
Resultados		19,00			6,95	
Densidade	Massa Mínima (g)	mA (g)	mB (g)	mC (g)	Tara (g)	Massa Específica (g/cm³)
	3000,00	2949,90	3181,30	1965,30	169,70	2,819

Fonte: Autor, 2024.

**Tabela 21 – Resultados dos ensaios físicos da brita 9,5mm**

<b>Brita 12,50mm</b>	<b>Φ Máximo (mm)</b>			<b>Módulo de Finura</b>		
Resultados	9,50			5,73		
Densidade	Massa Mínima (g)	mA (g)	mB (g)	mC (g)	Tara (g)	<b>Massa Específica (g/cm³)</b>
	2000,00	1992,3	2151,9	1251,7	1697	2,631

Fonte: Autor, 2024.

#### **4.3. Caracterização física do filler calcário:**

A composição química do filler calcário, denominado AG200, bem como a granulometria e porcentagem passante na peneira #200 estão disponibilizadas no anexo 01 e no anexo 02. Os resultados dos ensaios das massas específicas, foram realizados conforme a metodologia, e seus resultados apresentados na tabela 22, abaixo.

**Tabela 22 – Resultados da massa específica do AG200**

<b>Ensaio 1</b>	
M1 (g)	78,50
V (cm³)	28,40
Massa Específica (g/cm³)	2,764
<b>Ensaio 2</b>	
m2 (g)	71,60
V (cm³)	25,00
Massa Específica (g/cm³)	2,864
<b>Ensaio 3</b>	
m3 (g)	60,20
V (cm³)	20,80
Massa Específica (g/cm³)	2,894

Fonte: Autor, 2024.

Ao realizarmos uma média dos três ensaios realizados pelos frascos volumétricos, foi obtido o valor da massa específica de 2,840 g/cm³, valor utilizado nas conversões de massa para volume dos traços.

#### **4.4. Caracterização da Pozomix 7510:**

Os relatórios dos ensaios físicos e químicos da Pozomix 7510 considerados na metodologia, como a composição química do material, o blaine determinado pela NBR 16372:2015, a massa específica e a finura pela peneira #325, estão descritos no anexo 03.

#### **4.5. Resistência do cimento**

As determinações das resistências do cimento, nas idades iniciais e também nas idades de 28 dias, foram disponibilizadas pela cimenteira Intercement, juntamente com o lote de cimento, material em que foram realizados os ensaios. Os parâmetros utilizados no estudo foram as resistências finais em 28 dias, e a compatibilidade com os aditivos utilizados, ensaiados pelo ensaio de calorimetria com os materiais. Os resultados estão apresentados no anexo 04.

#### **4.6. Dosagem dos aditivos**

Com base no ensaio a dosagem do aditivo CQ PLAST PN 7057C, buscando em sua melhor performance, em redução de água e janela de manutenção, foi de 0,80% sobre a massa de cimento mais das adições. Já a adição do aditivo CQ PLAST PA229 visando resistências iniciais mais altas, intuito da incorporação deste aditivo, obteve uma dosagem de 0,50% sobre a massa de cimento mais adições.

#### **4.7. Concepção da curva de dosagem**

Será realizada a descrição do processo e memorial de cálculo de um dos traços da curva, o traço escolhido foi o BS30, determinado inicialmente para atingir a faixa de 30 MPa aos 28 dias de idade.

De acordo com a metodologia, foram aplicadas as equações elaboradas anteriormente, seguindo as etapas preparadas para apresentação dos quantitativos individuais dos materiais constituintes na mistura. A memória de cálculo descrita é com referente a um traço médio, dentro da curva, apresentada pela tabela 23.

##### **4.7.1. ETAPA 1: Resistência de projeto FCJ**

SD, estimado = 4,0MPa

Fck, 28 dias = 30,0 MPa

$$FCJ = fck + (1,65 \times SD)$$

$$FCJ = 30,0 + (1,65 \times 4)$$

$$FCJ = 36,6 \text{ MPa}$$

#### 4.7.2. ETAPA 2: Determinação do fator água x resistência

Relação a/c ideal para fck 30 MPa, curva de Abrams = 0,50

$$FCJ = 36,6 \text{ MPa}$$

$$\text{fator FAR} = \text{relação } \frac{a}{c} (\text{Ideal}) \times FCK$$

$$\text{fator FAR} = 0,50 \times 30,0$$

$$\text{fator FAR} = 15,00$$

#### 4.7.3. ETAPA 3: Estimativa do consumo inicial de água

FCJ, de projeto = 36,36 MPa

$$\text{Fator FAR} = 15,00$$

Pela tabela 04, o valor de = 1,20

$$\text{fator CAG} = \frac{\left( \left( \frac{FCJ}{\text{fator FAR}} \right) \cdot 100 \right)}{G}$$

$$\text{fator CAG} = \frac{\left( \left( \frac{36,6}{15,0} \right) \cdot 100 \right)}{1,20}$$

$$\text{fator CAG} = 203,00 \text{ litros}$$

Aplicando o valor de redução de 0,95% da massa de aglomerante.

$$\text{Fator CAG} = 174,00 \text{ litros}$$

#### 4.7.4. ETAPA 4: Determinação da Quantia de Aglomerante

$$\text{Fator CAG} = 203,0 \text{ litros}$$

Relação a/c ideal para fck 30 MPa, curva de Abrams = 0,50

$$\text{fator AGE} = \frac{\text{fator CAG} \cdot \left( 1 + \text{relação } \frac{a}{c} \text{ Ideal} \right)}{100}$$

$$\text{fator AGE} = 203,00 \times (1 + 0,50)$$

$$\text{fator AGE} = 305,00 \text{ kg}$$

#### 4.7.5. ETAPA 5: Estimativa da Quantidade de Adição Principal

Índice de finura, POZMIX 7510 = 6.503,00 g/cm<sup>2</sup>

Resistência do cimento, 28 dias, CPV RS INTERCEMENT = 45,40 MPa

Fator AGE = 305,00 kg

Resistência FCJ = 36,6 MPa

$$fator\ Filler = \left( \left( \frac{\text{índice de finura}}{\text{resist. FCJ}} \right) \times 1000 \right) \times (\text{fator AGE} \times \text{resist. CIMENTO}^{-4})$$

$$fator\ Filler = \left( \left( \frac{6.503,00}{36,60} \right) \times 1000 \right) \times (305,00 \times 45,40^{-4})$$

$$fator\ Filler = 0,246\ \%$$

**Quantia de adição principal** = (fator Filler x fator AGE) x 100

$$QUANTIA\ DE\ ADIÇÃO = (0,246\ \% \times 305,00\ kg) \times 100$$

$$QUANTIA\ DE\ ADIÇÃO = 75,03\ kg \cong 75,00\ kg$$

#### 4.7.6. ETAPA 6: Cimento excedente e adição mínima

Fator AGE = 305,00 kg

Fator H, pela tabela 5 = 0,2625

$$AEi = fator\ AGE \times fator\ H$$

$$AEi = 305,00\ kg \times 0,2625$$

$$AEi = 80,06\ kg$$

$$AMCf = fator\ AGE \times AEi$$

$$AMCf = 305,00\ kg - 80,06\ kg$$

$$AMCf = 224,94\ kg \cong 225,00\ kg$$

##### 4.7.6.1. ETAPA 6.1: Verificação das quantias de aglomerantes

$$fator\ FILLER + AMCf \leq fator\ AGE$$

$$75,00\ kg + 225,00\ kg \leq 305,00\ kg$$

$$300,00\ kg \leq 305,00\ kg \rightarrow OK!$$

#### 4.7.7. ETAPA 7: Determinação do agregado graúdo

Fator AGE = 305,00 kg

Relação a/c Ideal, Curva de ABRAMS = 0,50

Pela tabela 6, e para um teor de argamassa de 0,53%, H% = 0,305

Pela tabela 7, pelas proporções de aglomerantes, AG% = 0,699

$$AGR = \frac{\text{fator AGE} \cdot \left(1 + \frac{A}{C} \text{ Ideal}\right)}{H\% \cdot AG\%}$$

$$AGR = \frac{305,00 \text{ kg} \cdot (1 + 0,50)}{0,305 \cdot 0,699}$$

$$AGR = 1.049,00 \text{ kg}$$

Pela mescla teórica inicial das britas, onde pelo gráfico 8 encontramos uma proporção de 80,0% de diâmetro brita de 19,0mm e 20,0% de brita com diâmetro de 9,5mm, chegando a uma mescla com módulo de 6,70 mm, e aplicando uma proporção em que o módulo do diâmetro máximo deve ficar em 6,50mm para um teor de argamassa desejado em 0,53%

$$\% 19,00\text{mm} = \frac{\left(\frac{6,50}{\text{mód. finura } 19,0\text{mm}}\right) \times \text{mescla (gráfico 8)}}{10}$$

$$\% 19,00\text{mm} = \frac{\left(\frac{6,50}{6,945}\right) \times 6,70}{10}$$

$$\% 19,00\text{mm} = 62,70\% \rightarrow 657,00 \text{ kg}$$

$$\% 9,50\text{mm} = 32,30\% \rightarrow 391,00 \text{ kg}$$

#### 4.7.8. ETAPA 8: Determinação do agregado miúdo

$$AGRM = (1000 \times 2,0\%) - AMCF - AD.PRINCIPAL - \acute{A}GUA - AGRA$$

$$AGRM = (1000 \times 2,0\%) - 225,00\text{kg} - 75,00 - 203,00\text{kg} - 1.003,00\text{gk}$$

$$AGRM = (980,00) - \frac{225,00\text{kg}}{\gamma_{CIM}} - \frac{75,00\text{kg}}{\gamma_{AD}} - 203,00\text{kg} - \frac{1.003,00\text{kg}}{\gamma_{AGR}}$$

$$AGRM = 319,7 \text{ litros}$$

$$AGRM = 332,8 \text{ litros} \times \gamma \text{ Areia}$$

$$AGRM = 884,00 \text{ kg}$$

#### 4.8. Apresentação dos Traços Individuais:

**Tabela 23 – Apresentação dos Traços**

TRAÇOS EM MASSA (1,0m³)													
TRAÇOS	CPV RS (KG)	POZOMIX 7510 (KG)	FC (%)	BRITAS (KG)		AREIAS (KG)		ADITIVOS (KG)		ÁGUA (L)	MASSA (KG)	VOLUME (L)	
				19,00mm	9,5mm	GROSSA	MÉDIA	7057C	PA229				
BS20	182,0	80,0	10,0	693,0	346,0	340,0	554,0	2,109	1,110	180,0	2388,22	980,64	
BS25	206,0	74,0	10,0	699,0	348,0	389,0	489,0	2,309	1,215	176,0	2394,52	980,05	
BS30	234,0	72,0	10,0	701,0	350,0	441,0	415,0	2,565	1,350	174,0	2400,92	980,93	
BS35	251,0	69,0	10,0	704,0	351,0	463,0	383,0	2,712	1,428	170,0	2405,14	979,77	
BS40	267,0	66,0	10,0	708,0	353,0	481,0	359,0	2,850	1,500	166,0	2414,35	980,44	
BS45	287,0	58,0	10,0	714,0	356,0	497,0	339,0	3,002	1,580	160,0	2425,58	980,40	
BS50	325,0	50,0	10,0	721,0	360,0	520,0	290,0	3,325	1,750	155,0	2436,08	980,57	

T.U.P													
TRAÇOS	CPV RS	POZOMIX 7510	FC	BRITAS		AREIAS		ADITIVOS (%)		ÁGUA (L)	MASSA (KG)	VOLUME (L)	
				19,00mm	9,5mm	GROSSA	MÉDIA	7057C	PA229				
BS20	1,0	0,013	0,05	3,81	1,90	1,87	3,04	0,950	0,050	0,66	2388,22	980,64	
BS25	1,0	0,014	0,05	3,39	1,69	1,89	2,37	0,950	0,050	0,61	2394,52	980,05	
BS30	1,0	0,014	0,04	3,00	1,50	1,88	1,77	0,950	0,050	0,55	2400,92	980,93	
BS35	1,0	0,014	0,04	2,80	1,40	1,84	1,53	0,950	0,050	0,52	2405,14	979,77	
BS40	1,0	0,015	0,04	2,65	1,32	1,80	1,34	0,950	0,050	0,48	2414,35	980,44	
BS45	1,0	0,017	0,03	2,49	1,24	1,73	1,18	0,950	0,050	0,45	2425,58	980,40	
BS50	1,0	0,020	0,03	2,22	1,11	1,60	0,89	0,950	0,050	0,40	2436,08	980,57	

Fonte: Autor, 2024.

#### 4.9. Resultados no canteiro:

##### 4.9.1. Consumos Iniciais de Água e Abatimentos

Com preparo dos concretos em laboratório, como mencionado, foram realizadas dosagens iniciais de água, adições finais de água, abatimentos iniciais e abatimentos corrigidos. Os resultados dos consumos de água iniciais e abatimentos iniciais, estão descritos na tabela 19, pela identificação de cada traço calculado:

**Tabela 24 – Consumos iniciais de água e abatimento**

IDENTIFICAÇÃO DO TRAÇO	CONSUMO DE ÁGUA INICIAL	ABATIMENTO INICIAL S0 (mm)
BS20	- 155,0	145,0
BS25	- 100,0	165,0
BS30	- 80,0	140,0
BS35	- 40,0	160,0
BS40	+180,0	175,0
BS45	+300,0	140,0
BS50	+280,0	160,0

Fonte: Autor, 2024.

As informações dos consumos de águas iniciais, representam a quantia de água retida no traço, ou quantia excedente, sendo somada a quantia de água estimada total, a mesma foi determinada visualmente de acordo com a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, seguido da verificação efetiva do ensaio de abatimento.

Já em relação aos valores dos abatimentos iniciais, foi observado que, para um determinado abatimento X, a quantia de água necessária foi superior ao estimado pela quantia teórica do traço nos traços BS40, BS45 e BS50, traços em que houve uma redução na % da adição da Pozomix 7510.

Fator que leva a suposições de que, as variações nos consumos de água, nesse caso, são mínimas, ficando na faixa entre 180,0 litros de água por m<sup>3</sup> até 160,0 litros de água por m<sup>3</sup> nos traços com maiores consumos de cimento.

**Figura 17 – Abatimento inicial traço BS20**



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 18 – Traço BS50 pelo ensaio de abatimento e dentro da betoneira**



Fonte: Autor, 2024.

#### 4.9.2. Determinação da perda de abatimento (manutenção):

Após a determinação do abatimento intermediário (S1), e seguindo a metodologia aplicada no estudo, os valores encontrados após o tempo estipulado, e as adições de água finais visando a correção do abatimento, estão apresentados na tabela 20, abaixo:

**Tabela 25 – Perdas de abatimento e adições de água**

IDENTIFICAÇÃO DO TRAÇO	ABATIMENTO + 20min S1 (mm)	S0 ≠ S1 (mm)	ADIÇÃO DE ÁGUA FINAL (g)
TBS20	105,0	-40,0	+ 80,0
TBS25	140,0	-25,0	0,00
TBS30	110,0	-30,0	+ 40,0
TBS35	125,0	-35,0	+ 30,0
TBS40	150,0	-25,0	0,00
TBS45	125,0	-15,0	0,00
TBS50	150,0	-10,0	0,00

Fonte: Autor, 2024.

Após a adição final de água, os valores obtidos nos abatimentos finais (S3) estão descritos na tabela 21. Com isso, foi possível observar que, a perda de abatimento resultante da manutenção realizada, foi mais visível nos traços com consumos de cimento mais baixos, tendo mais evaporação de água, podendo resultar em janelas menores para manter a trabalhabilidade esperada.

Também, conseqüentemente, foi possível observar que nos traços com consumos maiores de cimento, não tiveram correções de abatimento, sem a necessidade da adição complementar de água.

Também, pode-se ser adotado uma redução na dosagem dos aditivos, tendo em vista que os mesmos mantiveram diferenças mínimas entre os ciclos de abatimentos.

**Figura 19 – Abatimento S2 traço BS35**



Fonte: autor, 2024

#### **4.9.3. Abatimentos finais**

Os valores dos abatimentos finais após a última adição de água, foram centralizados em uma faixa entre 125,0mm a 150,0mm, buscando a melhor relação e igualdade entre eles. Os resultados estão apresentados na tabela 21, abaixo:

**Tabela 26 – Abatimentos finais S2**

<b>IDENTIFICAÇÃO DO TRAÇO</b>	<b>ABATIMENTO S2 (mm)</b>	<b>HORÁRIO DA MOLDAGEM</b>
<b>TBS20</b>	130,00	10:25:00
<b>TBS25</b>	140,00	11:15:00
<b>TBS30</b>	130,00	11:55:00
<b>TBS35</b>	135,00	13:30:00
<b>TBS40</b>	150,00	14:10:00
<b>TBS45</b>	125,00	14:45:00
<b>TBS50</b>	150,00	15:20:00

Fonte: Autor, 2024.

Foi possível verificar que, ao realizar a verificação do abatimento S2, e para um mesmo valor de abatimento, o índice de consistência da mistura apresentou diferenças, conforme foi reduzido a quantia do agregado graúdo menor (12,5mm) ouve uma melhor trabalhabilidade e coesão. Diferenciando dos concretos das classes BS20 e BS25 em que a quantia de agregado graúdo com diâmetro maior (19,0mm) foram incorporados potencializando a redução no consumo de água na mistura. Fator que pode influenciar no módulo de finura do traço, para que aja uma um padrão homogêneo nos lançamentos desses concretos.

As diferenças nos ensaios de abatimento S1 + S2. Também, relacionado a distribuição das mesclas dos agregados miúdos secos e a incapacidade de se distribuir uniformemente na mistura, devido a granulometria da areia média, em maior proporção no traço BS30.

#### 4.9.4. Relações água/aglomerantes resultantes

Após a determinação do abatimento S2, foi possível quantificar as quantias de água totais adicionadas em cada concreto, e com isso, determinar uma relação água/aglomerante inicial, apresentada pela tabela 21. Essa relação será relacionada posteriormente com os resultados dos ensaios a compressão aos 28 dias de idade.

**Tabela 27 – Relações água/traços iniciais**

<b>TRAÇO</b>	<b>RELAÇÃO A/AG</b>
BS20	0,62
BS25	0,56
BS30	0,52
BS35	0,49
BS40	0,49
BS45	0,48
BS50	0,43

Fonte: Autor, 2024.

A moldagem dos corpos de prova, foram realizadas logo após a determinação do abatimento final. Os horários das respectivas moldagens estão na tabela 26.

Após a moldagem dos corpos de prova da referência BS20, foi verificado que o mesmo apresentou início de exsudação, após os primeiros 15 minutos da realização das moldagens, fato que deve ser em decorrência da relação do consumo de água elevado, e o baixo índice de materiais finos na mistura, ainda que o mesmo, foi determinado com consumos de agregados graúdos de diâmetro menores (12,5) e porcentagens superiores de adição, afim de evitar tal patologia.

**Figura 20 – Cura inicial e cura final em água**



Fonte: Autor, 2024.

No total, foram moldados, oito corpos de prova de cada mistura. A cura inicial dos corpos de prova foi realizada durante as primeiras 24 horas, apenas cobrindo os mesmos com uma fina lamina de matéria, afim de garantir que o calor expelido pelo concreto fosse mantido, sem que aja perda de água por evaporação de maneira precipitada.

#### **4.9.5. Avaliação dimensional dos corpos de prova**

Os parâmetros e verificações preliminares, os corpos de prova tiveram suas massas e dimensões verificadas, os respectivos valores estão apontados na tabela 28, 29, 30 e 31, nos respectivos dias em 7, 14, 28 e 56 dias de idade.

**Tabela 28 – Avaliação dimensional dos cp's em 7 dias**

IDENTIFICAÇÃO DO TRAÇO		MASSA (g)	$\Phi$ (mm)	ALTURA (mm)	DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )
<b>BS20</b>	CP01	3.704,80	101,20	198,00	2.326,21
	CP02	3.675,30	99,50	197,00	2.399,33
<b>BS25</b>	CP01	3.767,00	99,80	199,00	2.419,87
	CP02	3.723,00	98,20	197,00	2.495,25
<b>BS30</b>	CP01	3.717,50	100,50	196,00	2.390,96
	CP02	3.728,00	100,00	197,00	2.409,46
<b>BS35</b>	CP01	3.680,80	99,50	195,00	2.427,57
	CP02	3.742,10	99,00	199,00	2.442,88
<b>BS40</b>	CP01	3.730,00	100,40	199,00	2.367,55
	CP02	3.730,00	100,00	198,00	2.398,58
<b>BS45</b>	CP01	3.769,00	100,60	198,00	2.394,83
	CP02	3.814,00	100,50	200,00	2.403,97
<b>BS50</b>	CP01	3.785,00	99,20	199,00	2.460,93
	CP02	3.787,00	99,50	197,00	2.472,25

Fonte: Autor, 2024.

**Tabela 29 – Avaliação dimensional dos cp's em 14 dias**

IDENTIFICAÇÃO DO TRAÇO		MASSA (g)	$\Phi$ (mm)	ALTURA (mm)	DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )
<b>BS20</b>	CP03	3.698,30	100,00	198,00	2.378,19
<b>BS25</b>	CP03	3.779,20	100,40	195,00	2.447,98
<b>BS30</b>	CP03	3.757,20	100,50	197,00	2.404,23
<b>BS35</b>	CP03	3.763,30	100,50	197,00	2.390,86
<b>BS40</b>	CP03	3.751,30	99,50	200,00	2.412,21
<b>BS45</b>	CP03	3.763,70	101,50	196,00	2.373,21
<b>BS50</b>	CP03	3.794,00	101,00	197,00	2.403,80

Fonte: Autor, 2024.

Na tabela 30, as identificações classificadas com CP06 e CP07 foram destinadas aos ensaios do módulo de elasticidade estático, também aos 28 dias. Já as identificações CP04 e CP05 foram ensaiadas por compressão.

**Tabela 30 – Avaliação dimensional dos cp's em 28 dias**

IDENTIFICAÇÃO DO TRAÇO		MASSA (g)	Φ (mm)	ALTURA (mm)	DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )
<b>TBS20</b>	CP04	3.662,80	99,50	194,00	2.428,15
	CP05	3.684,00	100,00	195,00	2.405,44
	CP06	3.689,00	100,40	193,00	2.414,32
	CP07	3.662,20	100,40	197,00	2.348,11
<b>TBS25</b>	CP04	3.762,00	100,00	195,00	2.456,37
	CP05	3.778,20	100,20	198,00	2.419,88
	CP06	3.780,10	100,50	198,00	2.406,67
	CP07	3.799,00	99,70	198,00	2.457,67
<b>TBS30</b>	CP04	3.750,40	101,00	199,00	2.352,30
	CP05	3.752,10	100,60	198,00	2.384,09
	CP06	3.712,90	99,60	197,00	2.419,01
	CP07	3.749,60	99,40	200,00	2.415,97
<b>TBS35</b>	CP04	3.754,90	100,40	196,00	2.419,83
	CP05	3.739,40	100,00	197,00	2.416,83
	CP06	3.779,30	100,50	197,00	2.418,37
	CP07	3.835,00	99,60	200,00	2.461,09
<b>TBS40</b>	CP04	3.759,80	100,00	197,00	2.430,01
	CP05	3.712,80	99,30	195,00	2.458,55
	CP06	3.770,10	99,50	196,00	2.473,78
	CP07	3.748,10	100,20	196,00	2.425,10
<b>TBS45</b>	CP04	3.825,90	99,80	198,00	2.470,12
	CP05	3.774,00	99,60	197,00	2.458,82
	CP06	3.846,00	100,40	198,00	2.441,38
	CP07	3.815,90	100,20	198,00	2.444,03
<b>TBS50</b>	CP04	3.764,10	100,10	197,00	2.427,93
	CP05	3.794,20	100,70	198,00	2.406,06
	CP06	3.809,50	99,40	196,00	2.504,66
	CP07	3.806,10	100,80	198,00	2.408,82

Fonte: Autor, 2024.

Com a avaliação dimensional, foi possível avaliar a relação entre a densidade teórica dos traços e as densidades reais dos corpos de prova de 28 dias, onde os mesmos apresentaram uma diferença de até 1,2% da massa total prevista.

**Tabela 31 – Avaliação dimensional dos CP'S em 56 Dias**

IDENTIFICAÇÃO DO TRAÇO		MASSA (g)	Φ (mm)	ALTURA (mm)	DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )
<b>TBS20</b>	CP08	3.747,00	100,00	197,00	2.421,74
<b>TBS25</b>	CP08	3.740,40	100,00	198,00	2.405,27
<b>TBS30</b>	CP08	3.801,50	100,20	200,00	2.410,46
<b>TBS35</b>	CP08	3.764,50	99,70	198,00	2.435,35
<b>TBS40</b>	CP08	3.824,30	101,00	199,00	2.398,65
<b>TBS45</b>	CP08	3.805,30	99,30	199,00	2.469,15
<b>TBS50</b>	CP08	3.798,50	100,00	199,00	2.430,35

Fonte: Autor, 2024.

As determinações das densidades dos corpos de provas foram medidas afim de avaliar se ocorresse alguma diferença entre as massas no decorrer das idades.

#### 4.9.6. Determinação da resistência a compressão

As idades definidas para a realização dos ensaios nos corpos de prova foram respectivamente em 7 dias, 14 dias, 28 dias e 56 dias. Os resultados informados nos relatórios, de acordo com as normativas, estão expressos pela tabela 32, dos CP01 e CP02, abaixo:

**Tabela 32 – Resultados dos ensaios a compressão aos 7 Dias**

IDENTIFICAÇÃO		BS20	BS25	BS30	BS35	BS40	BS45	BS50
CP01	MPa	14,82	24,90	22,40	30,51	31,57	38,70	41,02
CP02		15,70	23,27	25,83	29,72	31,25	37,37	42,70
CP01	RUPTURAS	C	D	F	C	F	C	E
CP02		A	C	C	C	C	D	E

Fonte: Autor, 2024.

**Figura 21 – Ensaio de compressão CP02, traço BS45 em 7 Dias**



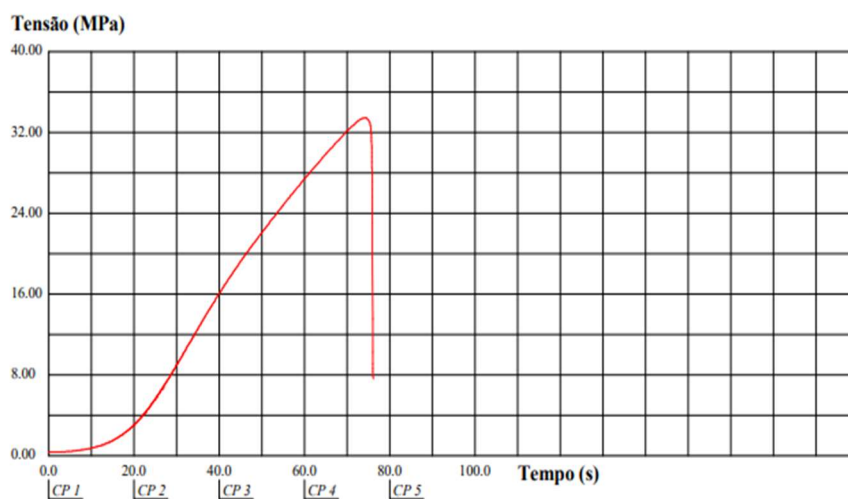
Fonte: Autor, 2024.

**Tabela 33 – Resultados dos ensaios a compressão aos 14 Dias**

IDENTIFICAÇÃO		BS20	BS25	BS30	BS35	BS40	BS45	BS50
CP03	MPa	17,08	26,84	24,61	33,49	32,26	40,6	44,21
CP03	RUPTURAS	F	C	F	C	C	D	G

Fonte: Autor, 2024.

**Gráfico 10 – Tensão (MPa) x Tempo (s), CP03 Traço BS35**



Fonte: Relatório de Ensaio de Compressão, nº 21734, UNISC, 2024.

**Tabela 34 – Resultados dos ensaios a compressão aos 28 Dias**

IDENTIFICAÇÃO		BS20	BS25	BS30	BS35	BS40	BS45	BS50
CP04	MPa	22,32	24,57	32,01	39,44	41,79	46,98	51,46
CP05		22,35	32,76	32,87	38,51	39,53	45,45	51,00
CP04	RUPTURAS	C	F	F	G	F	C	A
CP05		C	A	G	C	A	G	A

Fonte: Autor, 2024.

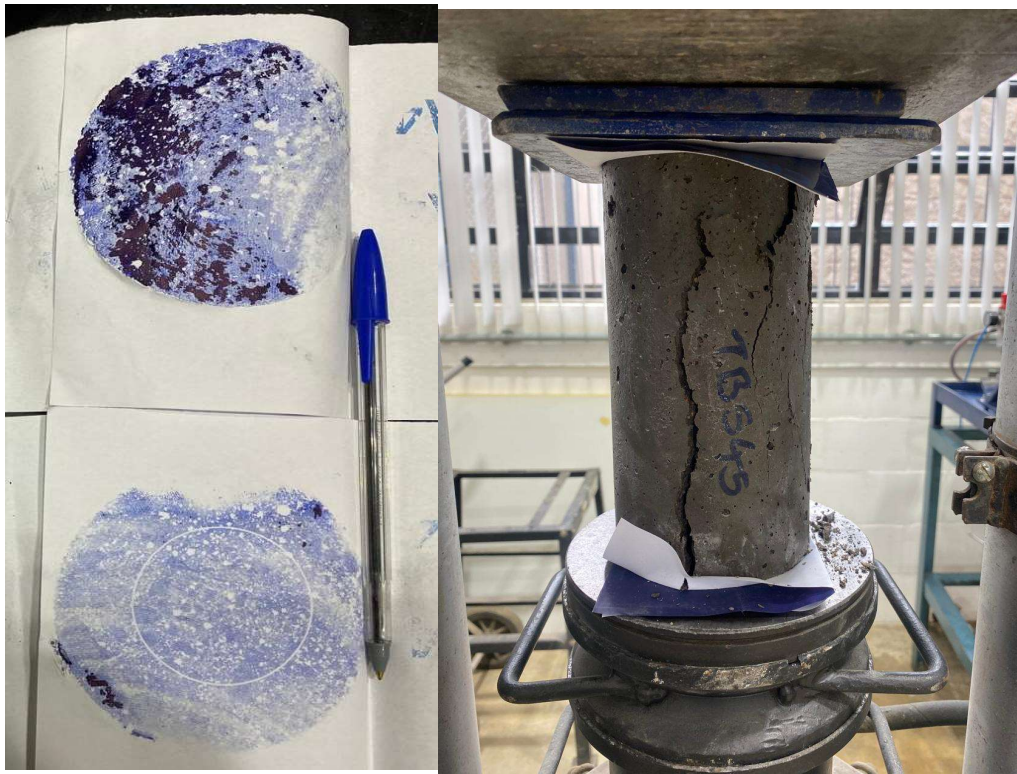
Avaliando individualmente cada traço ensaiado, somente o traço BS25 obteve um resultado abaixo do esperado nos desempenhos, fato que pode estar relacionado ao tipo da ruptura resultante após a carga máxima, que pode ser decorrência de alguma descentralização no momento do ensaio e no alinhamento entre o eixo do corpo de prova, e os eixos de aplicação da carga.

**Figura 22 – Ruptura “A” CP04 do traço BS50 aos 28 dias de idade**



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 23 – CP05 do Traço BS45 ensaiado com carbono a compressão**



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 24 – Antes x Depois CP05 traço BS35 aos 28 Dias**



Fonte: Autor, 2024.

Conforme mencionado, na metodologia, todos os corpos de prova, em todas as idades foram preparados por meio da retifica de corte vertical, e acomodados nos pratos da prensa com dispositivos auxiliares de neoprene, afim de garantir que houvesse o maior contato possível com os eixos de aplicação das cargas e a área da seção dos corpos de prova.

Inicialmente, pode-se verificar que, os traços BS20, BS25, BS30 e BS35 obtiveram desempenhos médios superiores ao restante dos traços, apresentando resistências em média de 3,10 MPa acima do esperado aos 28 dias. Porém, os mesmos traços compostos com uma % superior de pozolânas de alta reatividade, apresentaram crescimento inferior aos traços BS40, BS45 e BS50, sendo notável que, a quantia de reatividade da pozolâna, é proporcional a quantia de cimento dentro da mistura, garantindo que aja uma reatividade compensatória entre elas.

Os traços BS40, BS45 e BS50 obtiveram um crescimento de até 9,37 MPa entre os resultados de 7 dias a 28 dias de idade.

**Tabela 35 – Resultados dos ensaios a compressão aos 56 Dias**

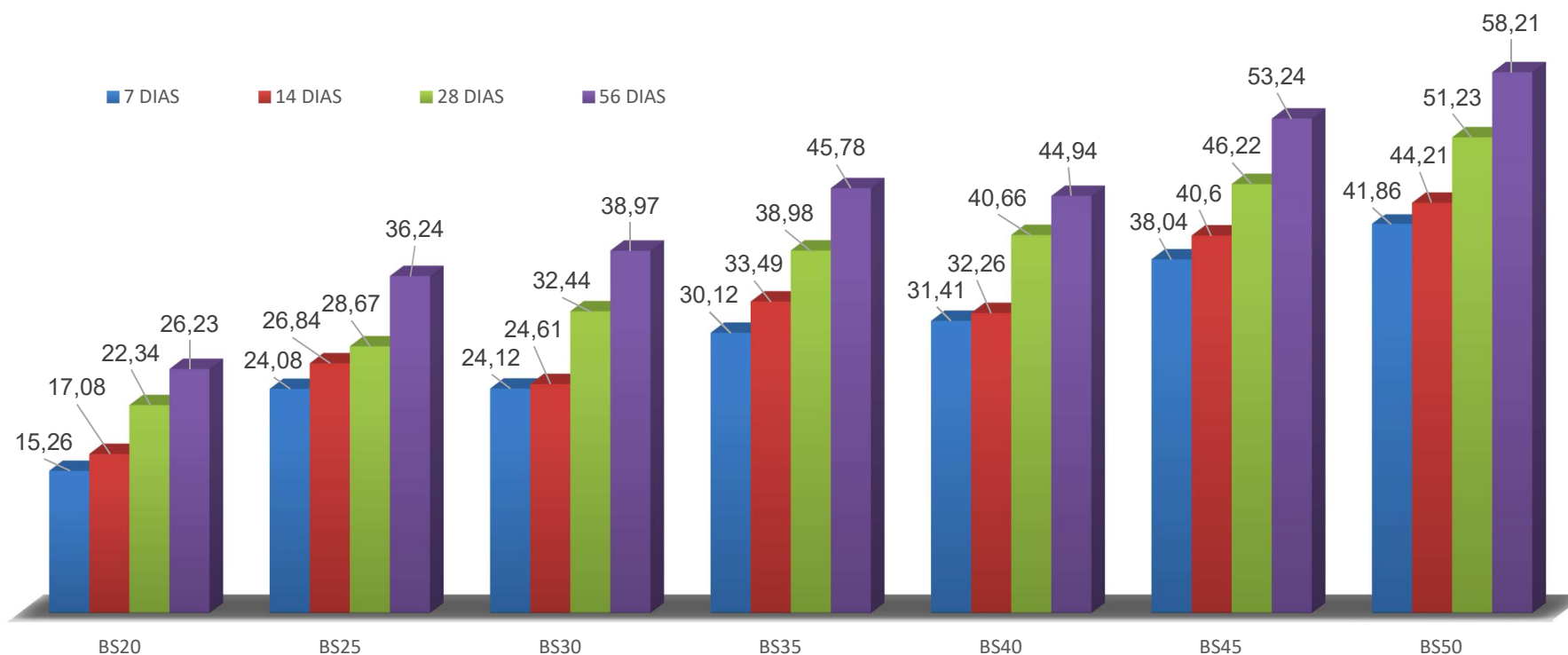
IDENTIFICAÇÃO		BS20	BS25	BS30	BS35	BS40	BS45	BS50
CP08	MPa	26,23	36,34	38,97	45,78	44,94	53,24	58,21
CP08	RUPTURAS	C	C	G	C	F	C	C

Fonte: Autor, 2024

Como previsto, o maior crescimento ocorreu entre as idades de 7 e 28 dias, e com crescimento contínuo até 56 dias, de até 7,02 MPa no traço BS45 de 28 dias até 56 dias, onde ocorreu a última determinação da resistência no estudo. Podemos tratar estes valores pela adição da Pozomix 7510, que tende a ter uma maior reatividade e efetividade em idades maiores, isso deve ao fato de que uma segunda fase de hidratação que continua a se desenvolver com o tempo, resultando em um aumento gradual da resistência e por ser um material silicoso que reage com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) presente no cimento, geram produtos de hidratação adicionais que melhoram a estrutura do concreto. Essa reação podendo promover uma combinação química com os componentes de hidratação do cimento, trazendo ganhos expressivos em todas as idades

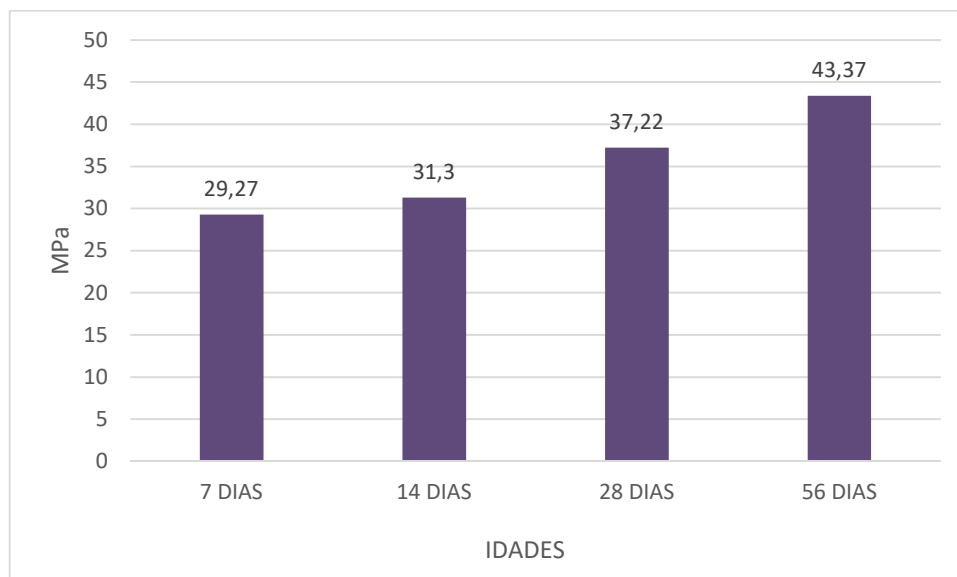
Ao fim dos ensaios de compressão, foram realizadas determinações para entender o comportamento dos traços em suas respectivas idades e seus desempenhos, descritos pelo gráfico 12, abaixo:

**Gráfico 11 – Comportamento dos resultados dos ensaios de compressão (MPa)**



Fonte: Autor, 2024.

**Gráfico 12 – Crescimento médio entre as idades de rupturas**



Fonte: Autor, 2024.

Como aponta o gráfico 12, realizado a partir das médias entre os traços, em cada idade de rupturas, podemos observar um crescimento de 7,95 MPa entre as idades de 7 e 28 dias, também um crescimento de 6,15 MPa entre 28 e 56 dias, demonstrando que as adições realizadas nos concretos, tanto com as adições silicosas ou com os aditivos apresentaram uma matriz mais densa, que contribuiu para este desempenho em idades maiores.

#### **4.9.7. Determinação do módulo de elasticidade estático**

Os ensaios para determinação dos módulos de elasticidade foram realizados a partir dos corpos de prova denominados em CP06 e CP07 respectivamente, os resultados obtidos de cada concreto são apresentados na sequência, pela tabela 36.

**Tabela 36 - Resultados dos ensaios nos Módulos de elasticidade aos 28 dias**

IDENTIFICAÇÃO	BS20	BS25	BS30	BS35	BS40	BS45	BS50
Eci médio (GPa)	33,38	38,52	36,72	38,45	40,12	24,75	41,25

Fonte: Autor, 2024.

**Figura 25 – Ensaio do módulo de elasticidade do CP07 BS20 aos 28 Dias**

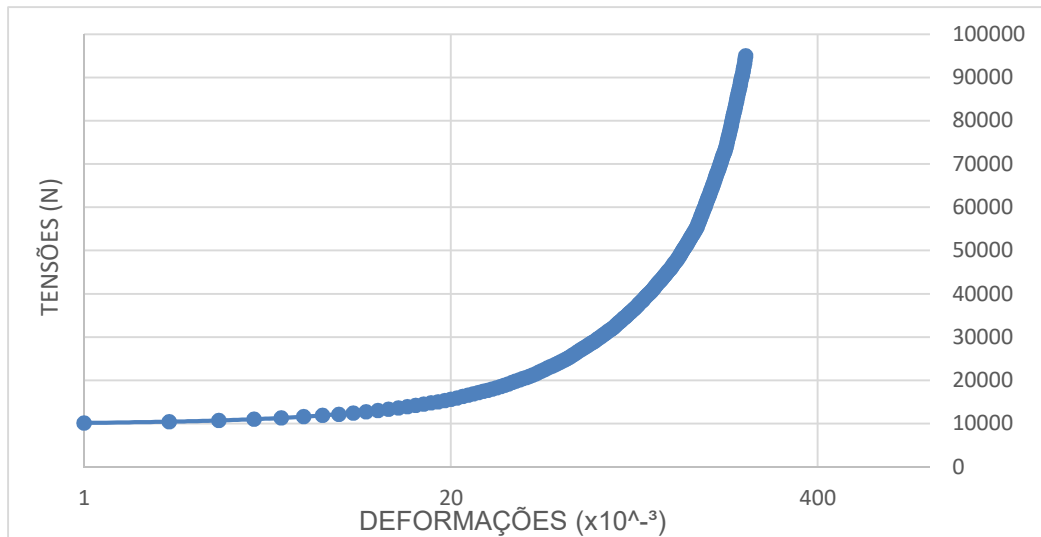


Fonte: Autor, 2024.

Pelo anexo 05, são apresentados os valores individuais, inicialmente com base nos resultados dos ensaios da compressão dos corpos de prova CP04 e CP05, as especificações teóricas, seguidas as determinações efetivas obtidas, as deformações nas leituras, variações nas tensões e resultados dos Eci e a resistência final a compressão dos corpos de prova.

Abaixo, como aponta o gráfico 13, de tensão por deformação, pode-se observar o comportamento de um dos corpos de prova durante o ensaio. Ao incrementar tensões superiores aos mínimos solicitados a curva de deformação se torna exponencial, onde inicialmente apresenta um aumento linear devido à elasticidade, seguindo-se de uma região plástica onde a deformação se torna permanente.

**Gráfico 13 – Curva de tensão x deformação CP06 do traço BS40**



Fonte: Autor, 2024.

A avaliação (tabela 36) foi realizada pela média das deformações de 2,0 (dois) corpos de prova.

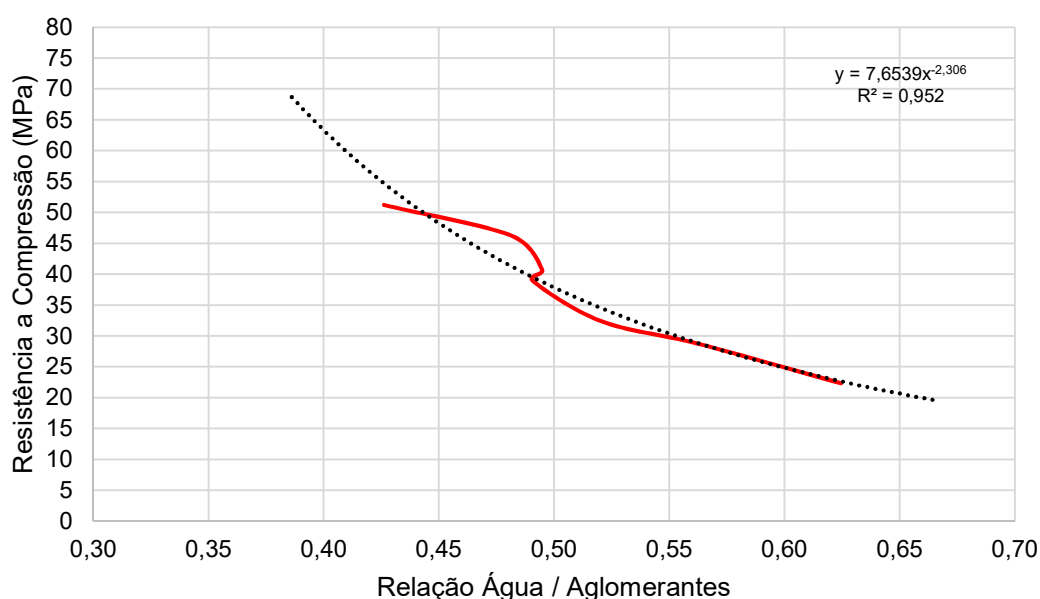
Foi possível identificar que, as resistências dos módulos foram superiores a 33,00 MPa com exceção do traço BS45, em que o CP07 do conjunto apresentou uma deformação sobre a tensão maior igual a 0,071592 mm, ocasionando uma redução na  $\Delta\varepsilon$  e conseqüentemente houve uma redução no ECI médio de 24,75 GPa, e uma resistência a compressão com mais de 20,0% de diferença entre a resistência média de referência, descartando o resultado.

Com tudo, também podemos identificar que, os resultados tiveram uma curva crescente nos resultados, atingindo até 41,25 GPa no traço BS50 e uma resistência a compressão de 50,44 MPa. Mostrando que a resistência compressão é proporcional ao módulo de elasticidade estabelecido.

#### **4.10. Relações água/aglomerantes resultantes**

A relação água/cimento de cada traço, foi determinada pela divisão da massa de água total no traço, até o abatimento final S2, pelo aglomerante total da composição, sendo constituído neste estudo, pelo cimento CPV RS, a Pozomix 7510 e o filler calcário (AG200).

**Gráfico 14 – Relação água/aglomerante resultantes**



Fonte: Autor, 2024.

Pode-se observar que, a curva resultante da relação água/aglomerantes dos traços BS30 e BS35 foram similares, fato atribuído, principalmente pelas diferenças nos ensaios de abatimento S1 + S2. Também, relacionado a distribuição das mesclas dos agregados miúdos secos e a incapacidade de se distribuir uniformemente na mistura, devido a granulometria da areia média, em maior proporção no traço BS30.

#### 4.11. Resultado dos métodos de referências

Igualmente aos traços experimentais deste estudo, os resultados obtidos no preparo dos concretos pelos métodos de referência são apresentados pela tabela 37, abaixo.

**Tabela 37 – Resultados dos métodos de referência no canteiro**

MÉTODO	CONSUMO DE ÁGUA INICIAL (g)	ABATIMENTO S0 (mm)	ADIÇÃO DE ÁGUA FINAL (g)	ABATIMENTO S1 (mm)	ABATIMENTO S2 (mm)	HORARIO
ABCP	- 500,0	150,0	0,0	120,0	120,0	09:00
ACI	- 120,0	145,0	+ 80,0	105,0	140,0	10:15
IPT	- 60,0	130,0	+ 70,0	105,0	145,0	11:15

Fonte: Autor, 2024.

Pode-se notar que, o consumo de água pelo método da ABCP teve um corte de água inicial elevado em relação aos demais, o que posteriormente pode levar a uma correção de volume no traço, mesmo mantendo o mesmo abatimento esperado.

**Figura 26 – CPS de referência**



Fonte: Autor, 2024.

#### 4.11.1. Resultados dos ensaios a compressão das referências

Os corpos de prova denominados em CP01 e CP02 foram destinados aos ensaios em 7 dias. Já os corpos de prova CP03 e CP04 foram rompidos aos 28 dias de idade.

**Tabela 38 – Resultados dos traços de referência**

IDENTIFICAÇÃO		7 DIAS			28 DIAS		
		ABCP	ACI	IPT	ABCP	ACI	IPT
CP01	MPa	37,60	35,92	37,86	47,86	50,57	48,98
CP02		35,91	37,29	37,29	48,00	50,90	49,03
CP01	RUPTURAS	C	C	C	C	C	C
CP02		C	C	C	C	C	C

Fonte: Autor, 2024.

## 5. CONCLUSÕES

A conclusão deste trabalho se deu em duas etapas: demonstrar a complexidade do tema abordado, evidenciando não apenas os principais desafios enfrentados, mas também as oportunidades que se apresentam para a superação dessas dificuldades. Através de uma análise crítica e embasada em dados concretos, pesquisas referenciadas, estudos de novos materiais, e com isso, relacionar as diferentes dimensões envolvidas, como porcentagens, e escolha dos materiais pela região.

Em seguida, uma avaliação entre os resultados obtidos pelo método experimental demonstrado no presente trabalho, com os métodos que serviram como base para realização das estimativas iniciais. Além disso, as reflexões propostas ao longo do estudo, ressaltam a importância da dosagem otimizada na produção de concretos dosados em centrais, para promover avanços significativos nesse campo, e atualização do meio atual, refletindo um compromisso com a excelência na engenharia e com a preservação ambiental.

O estudo realizado não apenas contribui para uma melhor compreensão do assunto, mas também abre caminho para novas investigações que possam aprofundar ainda mais o conhecimento. Assim, espera-se que os insights apresentados possam servir como base para futuras discussões e ações que visem a otimização e incorporação de novos materiais promovendo, assim, um desenvolvimento mais sustentável e consciente. Diante dos dados obtidos, é evidente que a aplicação e incorporação de novos materiais nas dosagens de concreto não só contribui para o avanço do conhecimento teórico, mas em avanços nas questões de desempenho e otimização dos materiais.

A inclusão das adições, como a Pozomix 7510 proporcionou resultados significativos no que diz respeito a trabalhabilidade no estado fresco do concreto, gerando mesmo que, com consumos baixos de cimento, uma reologia adequada, e uma coesão que facilita a aplicação. Já em relação aos desempenhos mecânicos, seja a compressão axial, quando aliada ao óxido de cálcio, presente no filler calcário (denominado AG200 neste estudo), foi possível, atingir reduções de até 20,00% em relação aos consumos de cimento sem que haja perda de desempenhos nas idades iniciais, e ainda, ganhos de resistências de até 7,00 MPa entre as idades de 28 dias para 56 dias. E, pela modificação

em sua matriz, com a adição de materiais mais “finos” em sua composição, a redução da porosidade fica visível pelos resultados dos módulos de elasticidade, que se demonstraram superiores aos estimados a partir dos resultados a compressão.

Também, a incorporação dos aditivos especificados neste estudo, foram significativamente importantes, pois esses produtos não só melhoram as propriedades do concreto, mas também podem melhorar o custo e a redução na pegada de carbono. Os ensaios realizados ao longo da pesquisa demonstraram que a variação nas dosagens pela calorimetria, pode resultar em diferenças substanciais nas características finais do material, como resistência, e tempos de pega no estado fresco do concreto.

Além disso, a análise da granulometria dos agregados e a escolha adequada dos mesmos foram fundamentais para garantir a coesão, reduções nos consumos de água, desempenhos mecânicos e a trabalhabilidade da mistura, desde as determinações das mesclas de acordo com cada mistura individualizada, até a quantia de cada material.

Ao realizar uma avaliação detalhada dos resultados obtidos aos 28 dias de cura nos ensaios de especificações, foi possível comparar os traços experimentais desenvolvidos e planejados neste estudo com os traços de referência previamente estabelecidos na literatura. Esse processo de comparação revelou que, por meio da implementação de técnicas e materiais específicos, conseguiu alcançar uma redução significativa de até 23,53% no consumo de cimento, totalizando 109kg de cimento no traço BS50. Além disso, ao incorporar materiais como o Pozomix 7510 e o Filler calcário (AG200), bem como ao utilizar uma combinação estratégica de aditivos e otimização das misturas entre os agregados, conseguimos não apenas manter a qualidade do concreto, mas também obter resultados que se situam dentro do mesmo desvio padrão dos traços de referência. De fato, os traços experimentais superaram os resultados de especificações dos traços de referência em aproximadamente 0,56 MPa aos 28 dias. Esse desempenho superior não apenas destaca a eficácia das metodologias empregadas, mas também sugere um potencial para maiores crescimentos nas características do concreto ao longo do tempo, especialmente evidenciado nas idades de 56 dias, onde continuamos a observar melhorias significativas na resistência.

## 6. REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C. High Performance Concrete. [s.l.] CRC Press, 1998.  
FIAZ, M. ACI CONCRETE MIX DESIGN (Plain Reinforced Concrete Design). [s.l: s.n.].

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 1, p. 69–76, 2003.

ABRAMS, D. A. Design of Concrete Mixtures. [s.l: s.n.].

ACACIO, A. et al. Módulo de Elasticidade: Dosagem e Avaliação de Modelos de Previsão do Módulo de Elasticidade de Concretos. 1 jan. 2002.

ALEXANDER, M.; BEUSHAUSEN, H. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique. *Cement and Concrete Research*, v. 122, p. 17–29, 1 ago. 2019. . Acesso em: 26 nov. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de Cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão corpos de prova cilíndricos. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7212: Concreto dosado em central - Preparo, fornecimento e controle. 2024

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. 2011.

MAILVAGANAM, N.P., RIXOM, M.R., MANSON, D.P., & GONZALES, C. (1999). Chemical Admixtures for Concrete (3rd ed.).

B, F. W.; E, T. S. The Laws of Proportioning Concrete. Transactions of the American Society of Civil Engineers, v. 59, n. 2, p. 67–143, 1 jan. 1907.

BHEEL, N. et al. Fresh and hardened properties of concrete incorporating binary blend of metakaolin and ground granulated blast furnace slag as supplementary cementitious material. Advances in Civil Engineering, v. 2020, 2020b.

BOGGIO, A. J.; ALEGRE, P. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL ESCOLA DE ENGENHARIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DOSAGEM DE CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND. [s.l: s.n.].

CARDWELL, D. S. L. Wheels, Clocks, and Rockets: A History of Technology. [s.l.] W. W. Norton, 2001.

Cardwell, Donald. Wheels, Clocks and Rockets: A History of Technology. New York and London: W. W. Norton, 1995.

CARNEIRO, F. L. L.; (BRAZIL), I. N. DE T. Dosagem de concretos. [s.l.] Instituto Nacional de Tecnologia, 1943.

CASTRO, A.; FERREIRA, F. Effect of particle packing in the durability of high performance concretes Efecto de empaquetamiento de las partículas en la durabilidad de los hormigones de alto desempeño. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[www.ricuc.cl](http://www.ricuc.cl)>.

CHRIST, R.; TUTIKIAN, B.; HELENE, P. Concreto de Ultra Alto Desempenho - UHPC: Fundamentos, propriedades e dosagem. [s.l.: s.n.]. Cimentos e Concretos. . [s.l.: s.n.].

Concrete technology: by A. M. NEVILLE and J. J. BROOKS Published by Longman Group UK Ltd., Longman House, Burnt Mill, Harlow, Essex CM20 2JE, England, 1987 ISBN 0 582 98859 4, Price £14.95 net, xiii + 438pp. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, v. 9, n. 3, p. 186, 1987.

CURTI, R. Eng. RUBENS CURTI DOSAGEM DO CONCRETO PELO MÉTODO ABCP.

CURTI, RUBENS. Dosagem do concreto pelo método ABCP. Palestra ABCP online. Concrete Show, 2020.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. Cement and Concrete Research, v. 32, n. 11, p. 1699–1704, 2002a.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. Cement and Concrete Research, v. 32, p. 1699–1704, 1 nov. 2002b.

DE OLIVEIRA, I. R. et al. Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico. [s.l.] Fazendo Arte, 2000.

DEWAR, J. Concrete mix design. Em: Advanced Concrete Technology. [s.l: s.n.]. p. 3–40.

DEWAR, J. D.; ANDERSON, R. (ROBERT). Manual of ready-mixed concrete. [s.l.] Blackie Academic & Professional, 2003.

DIAS VANDERLEI, R.; DIAS VANDERLEI BIBLIOGRAFIA DE REFERÊNCIA, R. MÉTODO DE DOSAGEM EPUSP/IPT. [s.l: s.n.].

ESPING, O. Effect of limestone filler BET(H<sub>2</sub>O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. Cement and Concrete Research, v. 38, n. 7, p. 938–944, 2008. TSIVILIS, S. et al. The permeability of Portland limestone cement concrete. Cement and Concrete Research, v. 33, n. 9, p. 1465–1471, 2003.

ETCHEVERRY, J. M. et al. Microstructural Analysis of Ternary Hybrid Alkaline Binders Containing Slag, Fly Ash and Portland Cement. (N. Banthia, S. Soleimani-Dashtaki, S. Mindess, Eds.) Smart & Sustainable Infrastructure: Building a Greener Tomorrow. Anais...Cham: Springer Nature Switzerland, 2024.

FIAZ, M. ACI CONCRETE MIX DESIGN (Plain Reinforced Concrete Design). [s.l: s.n.].

GHODDOUSI, P.; SHIRZADI JAVID, A. A.; SOBHANI, J. Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating concrete containing mineral admixtures. Construction and Building Materials, v. 53, p. 102–109, 1 fev. 2014.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto. [s.l.] Pini, 1993.

HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland 12.1 Introdução e Importância do Tema. [s.l.: s.n.].

HEMALATHA, M. S.; SANTHANAM, M. Characterizing supplementary cementing materials in blended mortars. *Construction and Building Materials*, v. 191, p. 440–459, 10 dez. 2018.

HUGO, V. et al. Concreto no Brasil: Breve história, desafios atuais e propostas para um futuro sustentável Rebeca Delatore Simões. [s.l.: s.n.].

KAPLAN, M. F. *Concrete Radiation Shielding: Nuclear Physics, Concrete Properties, Design and Construction*. [s.l.] Longman Scientific & Technical, 1989.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção. EPUSP, , 2002

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção. EPUSP, , 2002.

Manual ACI de Prática de Concreto 2000, Parte 1: Materiais e Propriedades Gerais do Concreto. Instituto Americano de Concreto. Farmington Hills, Michigan.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. [s.l.: s.n.].

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto - 5a Edição. [s.l.] Bookman Editora, 2015.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. São Paulo: Pini, 1997. 738 p.

NEVILLE, A.; AÏTCIN, P.-C. High performance concrete—An overview. *Materials and Structures*, v. 31, n. 2, p. 111–117, 1998.

OLIVEIRA, C. O. E. et al. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. *Revista Materia*, v. 23, n. 1, 2018.

PETRUCCI, E. G. R. *Materiais de construção*. [s.l.] Globo, 1982.

POPOVICS, S. Analysis of Concrete Strength Versus Water-Cement Ratio Relationship. *ACI Materials Journal*, v. 87, n. 5, [s.d.].

POWERS, T. C. *The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete*. [s.l.] Portland Cement Association, 1958.

POWERS, T. C. *The properties of fresh concrete*. [s.l.] New York (N.Y.) : Wiley, 1968.

RAMACHANDRAN, S. K.; RAMAKRISHNAN, V.; BANG, S. S. Remediation of concrete using micro-organisms. *ACI Materials Journal-American Concrete Institute*, v. 98, n. 1, p. 3–9, 2001.

RODRIGUES, P. P. F. *Parâmetros de dosagem racional do concreto*. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 1983.

RODRIGUES, P. P. F. *Parâmetros de dosagem racional do concreto*. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 1983.

SALOMÃO, P. E. A. et al. *Elaboração de tabelas para dosagem de concreto com base nos agregados utilizados no Nordeste Mineiro*.

Research, Society and Development, v. 7, n. 4, p. e1274305, 17 abr. 2018.

SCHNEIDER, M. et al. Sustainable cement production—present and future. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 7, p. 642–650, 2011.

SILVA, D. D. A. E; MELO, C. E. L. DE; GEYER, A. L. B. Estudo da influência do agregado graúdo inadequado nas propriedades dos concretos fresco e endurecido. *Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB*, v. 60, n. 2, p. 387, 30 jun. 2023.

SKEMPTON, A. W. John Smeaton FRS. [s.l.] Emerald Publishing Limited, 1991.

SNELLINGS, R.; MERTENS, G.; ELSEN, J. Supplementary Cementitious Materials. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v. 74, p. 211–278, 24 maio 2012.


SUN, B. et al. A mix design methodology of blast furnace slag and fly ash-based alkali-activated concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 140, p. 105076, 2023.

TAYLOR, F. W. et al. *Concrete, Plain and Reinforced ...* [s.l.] J. Wiley & sons, Incorporated, 1925.


TSIVILIS, S. et al. The permeability of Portland limestone cement concrete *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 9, p. 1465–1471, 2003.

VICAT, L. J.; GOUJON, A. *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires.* [s.l.] chez Goujon, libraire de le LL. AA. RR. M.me la duchesse De Berry et M.me la duchesse d'Orléans, Rue du Bac, 1818.


## ANEXO 01:

 <span style="float: right;">CERTIFICADO DE ANÁLISE</span>		
<p>EMPRESA : MINERAÇÃO MONEGO LTDA            ENDEREÇO: BR 392 KM 247 CAÇAPAVA DOS SUL-RS            PRODUTO: CALCÁRIO AGRÍCOLA AG 200            LAUDO Nº -1092/2024            REGISTRO MAPA: RS 003010-4.000002            MARCA : PROSOLO</p>		
DATA DA COLETA:	16/08/2024	
DATA DO RECEBIMENTO:	16/08/2024	
DATA EMISSÃO DO LAUDO:	16/08/2024	
RESULTADO DA ANÁLISE		
QUÍMICA	GARANTIA (%)	ANÁLISE (%)
CaO – Óxido de Cálcio	26	29,60
MgO – Óxido de Magnésio	14	16,10
PN – Poder de Neutralização	81	91,50
PRNT – Poder Relativo de Neutralização Total-	80	90,44
Soma dos Óxidos –	40	45,70
FÍSICA		
Passante Peneira 09 mesh (2,00mm)	100	100
Passante Peneira 20 mesh (0,84mm)	98	99,85
Passante Peneira 50 mesh (0,30mm)	85	97,26
Maiores 9 mesh		0
Retido 9 a 20 mesh		0,15
Retido 20 a 50 mesh		2,59
Menores 50 mesh		97,26
Umidade -	3	0,86
<small>*MÉTODO/LOGIA UTILIZADA-METODOLOGIA OFICIAL-IB-DAS Nº 28, DE 27/07/2007.            **RESULTADOS REFERENTES A AMOSTRAS ENVIADAS AO LABORATÓRIO.</small>		
<p><b>NELI LÚCIA CORADINI, B.A.S.C., A1</b>            Química Responsável            CRQ 05200071</p>		
<p>Caçapava do Sul, 16 de Agosto de 2024.</p>		

## ANEXO 02:

		<b>CERTIFICADO DE ANÁLISE</b>
<p> <b>EMPRESA :</b> MINERAÇÃO MONEGO LTDA  <b>ENDEREÇO:</b> BR. 392 KM 247 CAÇAPAVA DOS SUL-RS  <b>PRODUTO:</b> CALCÁRIO AGRÍCOLA AG 200  <b>LAUDO Nº</b> -1133/2024  <b>REGISTRO MAPA:</b> RS 003010-4.000002  <b>MARCA :</b> PROSOLO         </p>		
		<b>DATA DA COLETA:</b> 20/08/2024 <b>DATA DO RECEBIMENTO:</b> 20/08/2024 <b>DATA EMISSÃO DO LAUDO:</b> 20/08/2024
<b>RESULTADO DA ANÁLISE</b>		
<b>QUÍMICA</b>	<b>GARANTIA (%)</b>	<b>ANÁLISE (%)</b>
CaO – Óxido de Cálcio		
MgO – Óxido de Magnésio		
PN – Poder de Neutralização		
PRNT – Poder Relativo de Neutralização Total-		
Soma dos Óxidos –		
<b>FÍSICA</b>		
Retido Peneira 200 mesh		46,71
Passante Peneira 200 mesh		53,29
	3	
<small>METODOLOGIA UTILIZADA-METODOLOGIA OFICIAL-ISO-DAS Nº 28, DE 27/07/2007.            RESULTADOS REFERENTES A AMOSTRAS ENVIADAS AO LABORATÓRIO.</small>		
		<b>NELI LÚCIA CORADINI, A.B.A.S.C.,M</b> <small>Química Responsável</small> <small>CRQ 05200071</small>
<small>Caçapava do Sul, 20 de Agosto de 2024.</small>		

## ANEXO 03:

	<b>Boletim Periódico de Produção</b>	Cod: FORM 003 Data: Revisão: 1
PRODUTO: POZOMIX 7510		Período: jul/24
PLANTA: Montenegro - RS		
NORMA: NBR 12653 e 5752/2014 (Materiais Pozolânicos) Classe E		

### ENSAIOS QUÍMICOS

ENSAIOS	UNIDADE	MEDIA	Limites da NBR 12653
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%		>=50%
SO <sub>3</sub>	%		<=5,0%
Teor de umidade	%		<=3,0%
Perda ao Fogo	%		<=6,0%
Alcalis dispon. em Na <sub>2</sub> O	%		<=1,5%

### ENSAIOS FÍSICOS

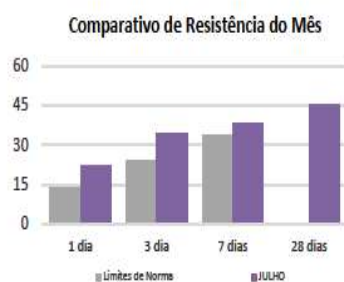
ENSAIO	NORMA	UNIDADE	MEDIA	Limites da NBR 12653
Blaine	NBR 16372	g/cm <sup>2</sup>	6.503	Não aplicável
Massa Específica	NM 23	g/cm <sup>3</sup>	2,45	Não aplicável
Finura #325	NBR 11579	%	0,88	< 34%

## ANEXO 04:



### Mapa de Qualidade

NOVA SANTA RITA		CIMENTO CAUE CPV-ARI RS				JULHO				2024		
EXIGÊNCIAS FÍSICAS E MECÂNICAS						EXIGÊNCIAS QUÍMICAS (%)						
	FINURA			TEMPO DE PEGA (min)		RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)				Perda ao Fogo	SO <sub>3</sub>	Resíduo Insolúvel
	#200 (%)	#325 (%)	BLAINE (cm <sup>3</sup> /g)	INICIO	FIM	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias			
EXIGENCIA NBR 16697	-	≤ 8	-	≥ 80	≤ 600	≥ 14,0	≥ 24	≥ 34		≤ 0,5	≤ 4,5	-
JULHO	0,0	0,5	5232	189	227	22,3	34,5	38,4	45,4	4,6	4,1	-
DESVIO PADRÃO	0,0	0,1	178	23	27	1,9	1,3	1,0	0,7	0,5	0,2	-
QUANTIDADE DE VALORES	20	20	20	23	23	16	23	22	7	20	20	-



Norma: NBR - 16697

Responsável Técnico: Suelba Souza Soares

Observações:





## ANEXO 05:

IDENTIFICAÇÃO DO TRAÇO		fck MÉDIO (MPa)	30% fc	TENSÃO CONVERTIDA TEÓRICA (N)	TENSÃO BÁSICA MENOR TEÓRICA (MPa)	ΔTENSÃO TEÓRICA (MPa)	TENSÃO CONVERTIDA MENOR REAL (MPa)	TENSÃO CONVERTIDA MAIOR REAL (MPa)	ΔTENSÃO REAL (MPa)	
<b>BS20</b>	CP06	22,34	6,70	53332,82	0,50	6,20	0,53230	6,74562	6,21332	
	CP07						0,51396	6,70895	6,19500	
<b>RESULTADOS</b>										
DEFORMAÇÃO SOBRE TENSÃO MENOR			DEFORMAÇÃO SOBRE TENSÃO MAIOR			Δε	E MÉDIO (MPa)	E MÉDIO (GPa)	RESISTÊNCIA FINAL A COMPRESSÃO	
L > mm *10 <sup>-3</sup>	L < mm *10 <sup>-3</sup>	ΔL mm *10 <sup>-3</sup>	L > mm *10 <sup>-2</sup>	L < mm *10 <sup>-2</sup>	ΔL mm *10 <sup>-2</sup>				CARGA (N)	MPa
0,0010096	0,0015603	0,00128	0,017439	0,022304	0,0199	0,00019	33379,8305	33,38	168170,0	21,49
									163600,0	20,83
IDENTIFICAÇÃO DO TRAÇO		fck MÉDIO (MPa)	30% fc	TENSÃO CONVERTIDA TEÓRICA (N)	TENSÃO BÁSICA MENOR TEÓRICA (MPa)	ΔTENSÃO TEÓRICA (MPa)	TENSÃO CONVERTIDA MENOR REAL (MPa)	TENSÃO CONVERTIDA MAIOR REAL (MPa)	ΔTENSÃO REAL (MPa)	
<b>BS25</b>	CP06	28,67	8,60	68444,58	0,50	8,10	0,50478	8,60875	8,10398	
	CP07						0,51396	8,63626	8,12230	
<b>RESULTADOS</b>										
DEFORMAÇÃO SOBRE TENSÃO MENOR			DEFORMAÇÃO SOBRE TENSÃO MAIOR			Δε	E MÉDIO (MPa)	E MÉDIO (GPa)	RESISTÊNCIA FINAL A COMPRESSÃO	
L > mm *10 <sup>-3</sup>	L < mm *10 <sup>-3</sup>	ΔL mm *10 <sup>-3</sup>	L > mm *10 <sup>-2</sup>	L < mm *10 <sup>-2</sup>	ΔL mm *10 <sup>-3</sup>				CARGA (N)	MPa
0,0005507	0,0011932	0,00087	0,023038	0,020835	0,0219	0,00021	38515,6088	38,52	240000,0	30,55
									240000,0	30,56
IDENTIFICAÇÃO DO TRAÇO		fck MÉDIO (MPa)	30% fc	TENSÃO CONVERTIDA TEÓRICA (N)	TENSÃO BÁSICA MENOR TEÓRICA (MPa)	ΔTENSÃO TEÓRICA (MPa)	TENSÃO CONVERTIDA MENOR REAL (MPa)	TENSÃO CONVERTIDA MAIOR REAL (MPa)	ΔTENSÃO REAL (MPa)	
<b>BS30</b>	CP06	32,44	9,73	77444,80	0,50	9,23	0,51396	9,68248	9,16852	
	CP07						0,51396	9,78345	9,26949	
<b>RESULTADOS</b>										
DEFORMAÇÃO SOBRE TENSÃO MENOR			DEFORMAÇÃO SOBRE TENSÃO MAIOR			Δε	E MÉDIO (MPa)	E MÉDIO (GPa)	RESISTÊNCIA FINAL A COMPRESSÃO	
L > mm *10 <sup>-3</sup>	L < mm *10 <sup>-3</sup>	ΔL mm *10 <sup>-3</sup>	L > mm *10 <sup>-2</sup>	L < mm *10 <sup>-2</sup>	ΔL mm *10 <sup>-3</sup>				CARGA (N)	MPa
0,00091784	0,0016521	0,00128	0,025975	0,026801	0,0264	0,00025	36724,6723	36,72	250500,0	31,89
									250300,0	31,87
IDENTIFICAÇÃO DO TRAÇO		fck MÉDIO (MPa)	30% fc	TENSÃO CONVERTIDA TEÓRICA (N)	TENSÃO BÁSICA MENOR TEÓRICA (MPa)	ΔTENSÃO TEÓRICA (MPa)	TENSÃO CONVERTIDA MENOR REAL (MPa)	TENSÃO CONVERTIDA MAIOR REAL (MPa)	ΔTENSÃO REAL (MPa)	
<b>BS35</b>	CP06	<b>38,98</b>	11,69	93057,90	0,50	11,19	0,52314	11,66491	11,14178	
	CP07						0,49560	11,65574	11,16015	
<b>RESULTADOS</b>										
DEFORMAÇÃO SOBRE TENSÃO MENOR			DEFORMAÇÃO SOBRE TENSÃO MAIOR			Δε	E MÉDIO (MPa)	E MÉDIO (GPa)	RESISTÊNCIA FINAL A COMPRESSÃO	
L > mm *10 <sup>-3</sup>	L < mm *10 <sup>-3</sup>	ΔL mm *10 <sup>-3</sup>	L > mm *10 <sup>-2</sup>	L < mm *10 <sup>-2</sup>	ΔL mm *10 <sup>-3</sup>				CARGA (N)	MPa
0,0013768	0,0011932	0,00129	0,031849	0,028728	0,0303	0,00029	38446,9526	38,45	239700,0	<b>30,52</b>
									318500,0	40,56
IDENTIFICAÇÃO DO TRAÇO		fck MÉDIO (MPa)	30% fc	TENSÃO CONVERTIDA TEÓRICA (N)	TENSÃO BÁSICA MENOR TEÓRICA (MPa)	ΔTENSÃO TEÓRICA (MPa)	TENSÃO CONVERTIDA MENOR REAL (MPa)	TENSÃO CONVERTIDA MAIOR REAL (MPa)	ΔTENSÃO REAL (MPa)	
<b>BS40</b>	CP06	40,66	12,20	97068,60	0,50	11,70	0,52314	12,09628	11,57315	
	CP07						0,48642	12,04115	11,55474	
<b>RESULTADOS</b>										
DEFORMAÇÃO SOBRE TENSÃO MENOR			DEFORMAÇÃO SOBRE TENSÃO MAIOR			Δε	E MÉDIO (MPa)	E MÉDIO (GPa)	RESISTÊNCIA FINAL A COMPRESSÃO	
L > mm *10 <sup>-3</sup>	L < mm *10 <sup>-3</sup>	ΔL mm *10 <sup>-3</sup>	L > mm *10 <sup>-2</sup>	L < mm *10 <sup>-2</sup>	ΔL mm *10 <sup>-3</sup>				CARGA (N)	MPa
0,0010096	0,0019275	0,00147	0,028637	0,031941	0,0303	0,00029	40124,0908	40,12	304900,0	38,82
									305100,0	38,85
IDENTIFICAÇÃO DO TRAÇO		fck MÉDIO (MPa)	30% fc	TENSÃO CONVERTIDA TEÓRICA (N)	TENSÃO BÁSICA MENOR TEÓRICA (MPa)	ΔTENSÃO TEÓRICA (MPa)	TENSÃO CONVERTIDA MENOR REAL (MPa)	TENSÃO CONVERTIDA MAIOR REAL (MPa)	ΔTENSÃO REAL (MPa)	
<b>BS45</b>	CP06	46,25	13,88	110413,74	0,50	13,38	0,49560	13,84903	13,35343	
	CP07						0,51396	13,83120	13,31725	
<b>RESULTADOS</b>										
DEFORMAÇÃO SOBRE TENSÃO MENOR			DEFORMAÇÃO SOBRE TENSÃO MAIOR			Δε	E MÉDIO (MPa)	E MÉDIO (GPa)	RESISTÊNCIA FINAL A COMPRESSÃO	
L > mm *10 <sup>-3</sup>	L < mm *10 <sup>-3</sup>	ΔL mm *10 <sup>-3</sup>	L > mm *10 <sup>-2</sup>	L < mm *10 <sup>-2</sup>	ΔL mm *10 <sup>-3</sup>				CARGA (N)	MPa
0,0011932	0,0011932	0,00119	0,038549	<b>0,071592</b>	0,0551	0,00054	24751,3109	<b>24,75</b>	<b>253200,0</b>	<b>32,24</b>
									371100,0	47,25
IDENTIFICAÇÃO DO TRAÇO		fck MÉDIO (MPa)	30% fc	TENSÃO CONVERTIDA TEÓRICA (N)	TENSÃO BÁSICA MENOR TEÓRICA (MPa)	ΔTENSÃO TEÓRICA (MPa)	TENSÃO CONVERTIDA MENOR REAL (MPa)	TENSÃO CONVERTIDA MAIOR REAL (MPa)	ΔTENSÃO REAL (MPa)	
<b>BS50</b>	CP06	51,23	15,37	122302,62	0,50	14,87	0,49560	<b>14,18007</b>	13,68447	
	CP07						0,51396	<b>14,65626</b>	14,14230	
<b>RESULTADOS</b>										
DEFORMAÇÃO SOBRE TENSÃO MENOR			DEFORMAÇÃO SOBRE TENSÃO MAIOR			Δε	E MÉDIO (MPa)	E MÉDIO (GPa)	RESISTÊNCIA FINAL A COMPRESSÃO	
L > mm *10 <sup>-3</sup>	L < mm *10 <sup>-3</sup>	ΔL mm *10 <sup>-3</sup>	L > mm *10 <sup>-2</sup>	L < mm *10 <sup>-2</sup>	ΔL mm *10 <sup>-3</sup>				CARGA (N)	MPa
0,0011014	-0,0002753	0,00041	0,034786	0,033501	0,0341	0,00034	41248,7494	41,25	356400,0	<b>45,38</b>
									396200,0	50,44