



**CENTRO UNIVERSITÁRIO ESTADUAL DA ZONA OESTE**

**Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais**

**Estudo da adição de areia artificial na fluidez e resistência do  
concreto**

**Leonardo Moreira de Lima**

Rio de Janeiro - RJ  
Março 2017

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ESTADUAL DA ZONA OESTE**

**Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais**

**Estudo da adição de areia artificial na fluidez e resistência do concreto**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre.

**Aluno:** Leonardo Moreira de Lima  
**Orientador:** Dr. Alex S. Sirqueira

Rio de Janeiro  
Março 2017

## SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT .....	ii
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivo.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Generalidades.....	3
2.2 Agregados.....	4
2.2.1 Agregados Graúdo.....	5
2.2.2 Agregados Miúdo .....	6
2.2.3 Classificação .....	8
2.2.4 Características dos agregados.....	13
2.2.4.1 Composição granulométrica.....	13
2.2.4.2 Forma das partículas .....	16
2.2.5 Massa Específica e Massa Unitária .....	20
2.2.6 Resistência a compressão e Módulo elástico .....	21
2.2.7 Substâncias deletérias .....	22
2.2.8 Absorção e umidade superficial .....	23
2.3 Cimento Portland .....	24
2.3.1 Adições Minerais.....	26
2.3.1.1 Classificação das Adições Minerais .....	27
2.3.2 Composição Química do Cimento Portland .....	30
2.3.2.1 Silicato tricálcico (C <sub>3</sub> S), Alita .....	30
2.3.2.2 Silicato dicálcico(C <sub>2</sub> S), Belita .....	31
2.3.2.3 Aluminato tricálcico(C <sub>3</sub> A).....	32
2.3.2.4 Ferro aluminato tetracálcico,C <sub>4</sub> AF .....	33
2.3.2.5 Componentes secundários do clínquer Portland.....	33
2.3.2.5.1 Óxido de Cálcio (CaO) livre.....	34
2.3.2.5.2 Óxido de magnésio (MgO) ou Periclásio.....	35
2.4 Hidratação do Cimento Portland .....	36
2.5 Calorimetria de Condução .....	38
2.6 Aditivos .....	40
2.7 Concreto .....	44

2.7.1 Considerações Gerais.....	44
2.7.1.1 Custo.....	44
2.7.1.2 Trabalhabilidade.....	45
2.7.1.3 Resistência e Durabilidade .....	46
2.7.2 Considerações Sobre Dosagem .....	47
2.7.2.1 Exigências de Projeto .....	48
2.7.2.2 Condições de exposição e operação .....	48
2.7.2.3 Cálculo da resistência de dosagem .....	51
2.7.3 Propriedades do Concreto no Estado Fresco .....	52
2.7.3.1 Segregação.....	53
2.7.3.2 Exsudação .....	53
2.7.3.3 Consistência.....	54
2.7.3.4 Coesão.....	56
2.7.3.5 Massa Específica do Concreto Fresco.....	57
2.7.4 Propriedades do Concreto no Estado Rígido .....	58
2.7.4.1 Resistência a Compressão .....	58
2.7.4.1.1 Resistência a Compressão e Fatores que a Afetam .....	59
3. Materiais e Métodos .....	63
3.1 Materiais .....	64
3.1.1 Cimento.....	64
3.1.2 Agregados.....	66
3.1.3 Aditivos .....	70
3.1.4 Traço utilizado.....	70
3.1.4.1 Ferramentas.....	70
3.1.4.2 Moldagem dos corpos de prova .....	71
3.1.4.3 Ensaio de consistência .....	72
3.1.4.4 Ensaio de resistência à compressão.....	73
3.1.5 Investigações de dosagens – Composição de Areias.....	73
4. Resultados e discussões.....	74
4.1 Caracterização dos Materiais.....	74
5. Conclusão .....	89
5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....	91
6. Referência Bibliográfica .....	92

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades do Concreto Influenciadas pelas Características do Agregado.....	5
Tabela 2: Limites da composição granulométrica do agregado graúdo (NBR 7211:2009) .....	6
Tabela 3: Limites granulométricos do agregado miúdo (NBR 7211:2009) .....	8
Tabela 4: Classificação mineralógica de rochas destinadas a produção de agregados .....	11
Tabela 5: Tipos de rochas comumente usados como fonte de agregados .....	14
Tabela 6: Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal) – fonte: (NBR 7211, 2009).....	15
Tabela 7: Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado miúdo com relação à massa do material.....	22
Tabela 8: Boletim de Ensaio de Cimento Portland – Conforme definido em norma. ....	25
Tabela 9: Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil.....	27
Tabela 10: Principais compostos do cimento Portland(NEVILLE(2015)) .....	30
Tabela 11: Principais características do aditivo utilizado; .....	42
Tabela 12: Características dos aditivos (ABCP; 2007 Apud MARTINS; 2008). .....	43
Tabela 13: Classes de agressividade ambiental (fonte NBR 6118) .....	46
Tabela 14: Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto (fonte NBR 6118) .....	47
Tabela 15: Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal (fonte NBR 6118) .....	47
Tabela 16: Abatimento recomendado para vários tipos de construção.....	49
Tabela 17: Desvio-padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto .....	52
Tabela 18: Método de adensamento por classes de consistência. ....	62
Tabela 19: Número de camadas para moldagem dos corpos de prova .....	63
Tabela 20: Potenciais de substituição da areia natural por pó de pedra .....	64
Tabela 21: Boletim de Ensaio Químicos do cimento CP III 40 RS .....	65
Tabela 22: Boletim de Ensaio Físicos e Mecânicos do cimento CP III 40 RS .....	65
Tabela 23: Caracterização do agregado miúdo estudado (Pó de pedra) .....	67
Tabela 24: Caracterização do agregado miúdo estudado (Areia Natural).....	68
Tabela 25: Caracterização do agregado graúdo estudado (Brita 0).....	69
Tabela 26: Caracterização do agregado graúdo estudado (Brita 1).....	70
Tabela 27: Composição granulométrica do agregado miúdo - Dosagem A .....	74
Tabela 28: Composição granulométrica do agregado miúdo - Dosagem B .....	77
Tabela 29: Composição granulométrica do agregado miúdo - Dosagem C.....	79
Tabela 30: Composição granulométrica do agregado miúdo - Dosagem D.....	81

Tabela 31: Composição granulométrica do agregado miúdo - Dosagem E .....	83
Tabela 32: Composição granulométrica do agregado miúdo - Dosagem F .....	86
Tabela 33: Característica do material estudado .....	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Pátio de estocagem de areia artificial</i> .....	2
Figura 2: <i>distribuição granulométrica para zona utilizável da areia artificial</i> .....	10
Figura 3: Análise por peneiramento, adaptado de BERNUCCI et al. (2006). .....	12
Figura 4: Esquema ilustrativo para orientar a avaliação da forma dos grãos de agregado (Adaptado de NBR 7389-1:2009).....	18
Figura 5: Comparação visual de arredondamento e esfericidade do grão de areia (Adaptado de FONSECA;2002) .....	19
Figura 6: Agregado em várias condições de umidade (Adaptado de MEHTA e MONTEIRO;2008).....	23
Figura 7: Inchamento devido à umidade no agregado miúdo(Adaptado de MEHTA e MONTEIRO;2008).....	24
Figura 8: Anel de $Al_6O_{18}$ na estrutura do $C_3A$ (TAYLOR, 1998 apud MARINGOLO, 2001), mostrando as situações dos átomos de Al próximos aos cantos de um cubo. ....	33
Figura 9: Modelo esquemático dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio .....	38
Figura 10: Curva típica de evolução de calor de hidratação de Cimento Portland (Fonte: adaptado de ASTM C1679-092). .....	39
Figura 11: Representação esquemática da curva de calor de hidratação e critérios para determinação das variáveis [adaptação de Betiole (2007)] citado por QUARCIONI (2008).....	40
Figura 12: Gráfico para a determinação da relação A/C em função das resistências do concreto aos 28 dias. ....	50
Figura 13: Procedimento de ensaio de abatimento do tronco de cone (MEHTA; MONTEIRO,1994).....	55
Figura 14: Conjunto de Slump Test (fonte: própria) .....	55
Figura 15: Formas de abatimento do concreto fresco (Neville, 2015). .....	56
Figura 16: a) Concreto com tendência a segregação, b) Concreto coeso. ....	57
Figura 17: Influência da relação água/cimento, ar incorporado e teor de cimento na resistência do concreto (MEHTA e MONTEIRO; 2008). ....	59
Figura 18: representação da microestrutura do concreto (Adaptada de MEHTA & MONTEIRO, 2008).....	60
Figura 19: Ensaios granulométrico do cimento CP III 40 RS, realizada por analisador de partículas CILAS - 920L; Fonte: Votorantim Cimentos.....	66
Figura 20: Pó de pedra analisado e sua faixa granulométrica.....	66
Figura 21: Granulometria da areia natural estudada .....	67
Figura 22: Brita 0 analisada e sua faixa granulométrica.....	68
Figura 23: Brita 1 analisada e sua faixa granulométrica.....	69
Figura 24: Modalgem dos corpos de prova como descrito pela NBR 5738;.....	71

Figura 25: Ensaio de consistência pelo método de Slump.....	72
Figura 26: ensaios de resistência à compressão simples .....	73
Figura 27: Curva granulométrica do agregado miúdo - Dosagem A .....	75
Figura 28: Curva de Abrams para Dosagem A.....	76
Figura 29: Trabalhabilidade em função da adição - Dosagem A.....	76
Figura 30: Curva granulométrica do agregado miúdo - Dosagem B .....	77
Figura 31: Curva de Abrams para Dosagem B.....	78
Figura 32: Trabalhabilidade em função da adição - Dosagem B.....	78
Figura 33: Curva granulométrica do agregado miúdo - Dosagem C .....	79
Figura 34: Curva de Abrams para Dosagem C .....	80
Figura 35: Trabalhabilidade em função da adição - Dosagem C.....	81
Figura 36: Curva granulométrica do agregado miúdo - Dosagem D .....	82
Figura 37: Curva de Abrams para Dosagem D .....	82
Figura 38: Trabalhabilidade em função da adição - Dosagem D.....	83
Figura 39: Curva granulométrica do agregado miúdo - Dosagem E .....	84
Figura 40: Curva de Abrams para Dosagem E.....	85
Figura 41: Trabalhabilidade em função da adição - Dosagem E.....	85
Figura 42: Curva granulométrica do agregado miúdo - Dosagem F.....	87
Figura 43: Curva de Abrams para Dosagem F .....	87
Figura 44: Trabalhabilidade em função da adição - Dosagem F .....	88

## RESUMO

Restrições impostas pelos órgãos fiscalizadores têm tornado a utilização e obtenção de areia natural cada vez mais difícil. Diversos estudos buscam alternativas à utilização da areia natural em concreto, visando redução aos impactos ambientais e aos custos relacionados a prática desta exploração, uma alternativa ao uso da areia natural seria a substituição deste material pela areia artificial ou de britagem.

Sugere-se que esta substituição resultaria em benefícios ao meio ambiente, não apenas com a redução do uso da areia natural, mas também, com o destino dado a areia artificial, pois esta deixaria de ser depositada nos pátios das unidades produtoras de agregados (Figura 1), material que está sujeito à ação do vento, e considerado um resíduo do processo na produção da brita.

Este trabalho consiste no estudo da viabilidade técnica em substituir no concreto, areia natural produzida na cidade de Seropédica pela areia artificial gerada na fabricação de agregados da mesma região, em proporções que podem variar de 0 a 100%. Serão consideradas como parâmetros de análise, as propriedades, no estado fresco e endurecido, apresentadas pelos concretos produzidos com as combinações de areia natural e artificial. Essas propriedades serão comparadas com as propriedades apresentadas pelo concreto produzido apenas com areia natural (0% de substituição). Areia artificial, gerada na fabricação de agregados miúdos de britagem, têm sido cada vez mais utilizada na produção de concretos, em substituição aos agregados miúdos naturais. Fato que, surge uma forte necessidade do desenvolvimento e de estudos sobre a viabilidade técnica em substituir a areia natural pela areia de britagem na produção de concreto em centrais dosadoras. O potencial crescente do mercado pela demanda de areia de britagem tem incentivado os fabricantes de agregados a buscar melhorias para os seus produtos. Visando um melhor entendimento das características dos agregados miúdos nas características concreto fresco e rígido, este trabalho analisou agregados miúdos de britagem da região de Seropédica, sendo o principal objetivo do programa experimental, analisar a influência da granulometria nas propriedades do concreto. Para tal, as principais propriedades avaliadas em concretos e argamassas foram consistência e resistência à compressão.

Palavras-chave: Areia de britagem, areia natural, concreto, agregado, granulometria.

## ABSTRACT

Restrictions imposed by inspection agencies have made the use and obtaining of natural sand increasingly difficult, several studies seek alternatives to the use of natural sand in concrete, aiming to reduce environmental impacts and other costs related to an exploration practice, an alternative to Use of natural Sand would be the substitution of this material for artificial sand or crushing.

It is suggested that this substitution would result in benefits to the environment, not only with the reduction of the use of natural sand, but also, with the destination given to the artificial sand, since it would no longer be deposited in the yards of the units Of production of aggregates (Figure 1), material that is subject to wind action, and is considered a process residue in the production of the gravel.

This work consists in the study of the technical feasibility of replacing the natural sand produced in the city of Seropédica with the artificial sand generated in the manufacture of aggregates of the same region, in proportions ranging from 0 to 100%. The properties of fresh and hardened concrete presented by concretes produced with natural and artificial sand will be considered the parameters of analysis. These properties will be compared with the properties presented by the concrete produced with natural sand (0% replacement).

Artificial sand, generated in the manufacture of fine aggregates crushing, has been increasingly in the production of concrete, replacing the natural fine aggregates. In fact, there is a great need for development and studies on the technical feasibility of replacing natural sand in crushing sand in the production of concrete in metering plants. The increasing market potential for artificial sand has encouraged aggregate manufacturers to seek improvements for their products. Aiming at a better understanding of the characteristics of the small aggregates in the characteristics of fresh and rigid, this work reported fine aggregates of crushing of the region of Seropédica, being the main objective of the experimental program, to analyze the influence of granulometry on concrete properties. For this, the main properties evaluated in concrete and mortars were consistency and resistance to compression.

Keywords: Industrial sand, Natural sand, concrete, aggregate, granulometry

## 1. INTRODUÇÃO

Concreto é o material construtivo de grande aceitação pela sociedade, podendo ser encontrado em casas, estádios, edifícios, rodovias sob a forma de pavimento rígido, pontes, obras de saneamento, bases e torres de energia eólica.

Segundo MEHTA & MONTEIRO(2008), o material de construção mais utilizado no mundo é o concreto, com consumo estimado em 11 bilhões de toneladas métricas ao ano, não havendo material mais consumido pela humanidade em quantidade, com exceção da água. Dentre os principais componentes utilizados na produção do concreto estão os agregados, que estão subdivididos em agregado graúdo e agregado miúdo, e os materiais aglutinantes que são formados por cimento hidráulico e água.

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), agregado miúdo é resultado da britagem de rochas estáveis, cuja partículas passam pela peneira com abertura de malha de 4,75mm e ficam retidos na peneira de 75  $\mu\text{m}$ , são materiais granulares, geralmente inertes e com dimensões e propriedades adequadas para o uso em diversas aplicações na construção civil. Conforme CUCCHIERATO (2000), estão entre os materiais mais consumido em todo mundo, deste modo, uma busca por materiais alternativos com potencial para substituir os agregados, em particular o agregado miúdo de origem natural, mesmo que parcialmente pelo agregado miúdo de britagem, tem motivado um número cada vez maior de pessoas dedicadas a substituir este bem. Neste sentido, a aplicação de areia de britagem em concreto, tem se mostrado uma alternativa promissora, proporcionando benefícios à construção civil e ao meio ambiente, o que sugere uma união vantajosa, porém, pode produzir efeitos no concreto diferentes dos produzidos pela areia natural, em especial nas propriedades no estado fresco, como diminuição da plasticidade e aumento na demanda de água. Isso ocorre, pois a britagem, em geral, confere ao material uma maior porcentagem de material pulverulento – dimensões inferiores a 75  $\mu\text{m}$ . A textura e a forma dos grãos é outro fator que pode colaborar para a modificação das características do concreto no estado fresco (ALMEIDA, 2005).

Tais efeitos introduzidos no concreto em seu estado fresco, podem inviabilizar ou minimizar a aplicação deste material, em especial, em concretos que necessitam maior fluidez, como os concretos bombeáveis com classes de abatimentos maiores que 160mm (NBR 8953) e concretos auto-adensáveis.

Uma análise da literatura sugere que a utilização de britadores mais modernos do tipo “VSI” (Vertical Shaft Impact – britadores de impacto de eixo vertical), podem minimizar o teor de material pulverulento gerado, visto que estes equipamentos são capazes de produzir agregados com grãos mais esféricos e arredondados, aproximando a areia de britagem do material extraído dos rios, diferente daquilo que é observado no processo atual, devido à natureza geológica da região que conduz a formação de grãos lamelares pelos processos de britagem convencionais.



**Figura 1: *Pátio de estocagem de areia artificial***

### **1.1 Objetivo**

O principal objetivo deste estudo experimental é mostrar a viabilidade de se substituir, a areia natural produzida na cidade de Seropédica por pó de pedra em traços de linha das usinas produtoras de concreto na região.

São objetivos específicos deste trabalho:

- Demonstrar a viabilidade técnica da fração miúda do agregado gerado na cidade de Seropédica RJ, como material de construção constituinte do concreto.
- Ensaio de caracterização em todos os materiais envolvidos;

- Avaliar a resistência à compressão axial do concreto nas seguintes idades: 3, 7, 14 & 28 dias;
- Avaliar a consistência pelo abatimento do tronco de cone (Slump Test);
- Avaliar a perda de abatimento nos instantes iniciais dos concretos produzidos com pó de pedra;

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Generalidades**

Diante da elevada oferta e preços relativamente baratos e na sua grande maioria por não reagirem com os aglomerantes, salvos os casos que são mitigados por elevadas adições no cimento, os agregados, de uma forma geral, historicamente têm sido tratados como material inerte e de simples preenchimento do concreto de cimento Portland (MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997). De acordo com SBRIGHI NETO (2005), no início do século XX, os agregados eram relativamente abundantes, baratos e de boa qualidade, devido a estes fatos, a eles eram atribuídos esse papel coadjuvante no concreto.

Ainda segundo Neville (1997) “o fator econômico não é o único motivo para o seu uso, visto que os agregados conferem características técnicas indispensáveis ao concreto como por exemplo módulo elástico, parâmetro mecânico fundamental em grandes obras de infraestrutura que exigem maior estabilidade dimensional.”

Ao passar do tempo, juntamente com a evolução dos ensaios laboratoriais, sua importância técnica e econômica foi evidenciada, com importante participação de uma concorrência comercial acirrada, ociosidade fabril devido ao excesso de demanda entre os produtores de agregados e a conscientização da sociedade em relação ao meio ambiente, contribuíram para esta análise mais criteriosa na escolha dos agregados.

Nos últimos anos, o esgotamento das jazidas de agregado miúdo natural nas proximidades dos grandes centros consumidores, o aumento dos custos de transporte, o acirramento da competição comercial entre os produtores de concreto e a conscientização da sociedade, que demanda leis de proteção ambiental, vieram a

contribuir para um melhor entendimento sobre a importância dos agregados (SBRIGHI NETO, 2005).

## **2.2 Agregados**

Agregado é um material granular, com forma e volume variáveis, geralmente são inertes e com propriedades compatíveis para utilização na construção civil.

Conforme descrito pela norma NBR 7211 (2009), os agregados podem ser de origem natural e são encontrados na natureza fragmentados ou são resultantes da britagem de rochas, através de processos industriais.

PETRUCCI (1998), definiu o agregado como um material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para aplicações em obras de engenharia.

BAUER (1995), descreveu o agregado como um material particulado, sem forma definida, incoeso, de atividade química praticamente inerte, constituído de misturas de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos.

Até há pouco tempo o termo "inerte" era utilizado com certa frequência quando associado ao agregado, mas as composições mineralógicas das rochas que o constituem não são realmente inativas, a medida em que as suas propriedades físicas e químicas afetam o desempenho do concreto produzido com estes materiais (Neville, 1997).

Outros autores conceituaram o agregado de forma semelhante, e todos eles possuíam opiniões próximas de que este material desempenhava um papel de destaque em concretos, sendo ele sob o ponto de vista econômico, ou sob o ponto de vista da sua contribuição técnica para uso em concreto. Adotando como um valor médio, bastante representativo, que 70% do concreto como conhecemos hoje é constituído por agregados, constatação que nos remete a importância do uso de agregados com especificações técnicas adequadas, SBRIGHI NETO, relaciona algumas destas características dos agregados às principais propriedades do concreto, na Tabela 1.

Após conhecimento de tais propriedades, foi dada maior atenção na escolha dos agregados para uso em concreto em ambientes específicos (SBRIGHI NETO, 2005).

**Tabela 1: Propriedades do Concreto Influenciadas pelas Características do Agregado**

Propriedades do Concreto	Características Relevantes do Agregado
Resistência Mecânica	Resistência mecânica
	Textura superficial
	Limpeza
	Forma dos grãos
	Dimensão máxima
Retração	Módulo de elasticidade
	Forma dos grãos
	Textura superficial
	Limpeza
	Dimensão máxima
Massa unitária	Massa específica
	Forma dos grãos
	Granulometria
	Dimensão máxima
Economia	Forma dos grãos
	Granulometria
	Dimensão máxima
	Beneficiamento requerido
	Disponibilidade

### 2.2.1 Agregados Graúdo

De acordo com a definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 7211; 2009), agregado graúdo são aqueles que os grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, conforme descrito na Tabela 2.

Em termos gerais, o uso generalizado só ocorre na indústria do de concreto, em outras aplicações do mercado da construção civil é conhecido, conforme cada caso, pelo nome específico: Areia artificial, brita zero, brita 1, brita 2, brita 3, brita 4, rachão, brita graduada e bica corrida.

O termo “agregado para a construção civil” é empregado no Brasil para identificar um segmento do setor mineral que produz matéria prima mineral bruta ou beneficiada de emprego imediato na indústria da construção civil, e são basicamente a areia e a rocha britada (VALVERDE, 2001).

Tabela 2: Limites da composição granulométrica do agregado graúdo (NBR 7211:2009)

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

<sup>a</sup> Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.

<sup>b</sup> Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados. Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

### 2.2.2 Agregados Miúdo

Durante o processo de produção de agregados por britagem, é gerado uma porção considerável de material fino, destinado à utilização em diversos ramos da construção sob a forma de agregado miúdo.

Agregado miúdo pode ser definido como areia de origem natural extraída do leito dos rios ou resultante do processo de britamento de rochas estáveis, neste caso denominado areia artificial ou britada, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira de 4,8 mm e ficam retidos na peneira de 0,075 mm.

De acordo com a definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 7211; 2009), agregados miúdos são aqueles que os grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ressalvados os limites estabelecidos na Tabela 3, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1.

Segundo MEHTA & MONTEIRO(2008), os agregados são materiais relativamente baratos e por isso, têm sido comumente tratados como material de enchimento do concreto. No entanto, do ponto de vista tecnológico, as características relevantes do agregado graúdo e miúdo contribuem na porosidade, distribuição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, resistência a compressão, módulo de elasticidade e substâncias deletérias. Essas características são resultados da composição mineralógica da rocha, no entanto, existem características que dependem do tipo de equipamento utilizado para produção do agregado, sendo elas: forma e textura superficial das partículas, absorção, tamanho de partícula e granulometria do agregado.

A forma e a textura do agregado miúdo têm um efeito importante no concreto fresco e exerce grande efeito sobre a resistência e durabilidade do concreto endurecido, de fato, os efeitos da forma e textura do agregado fino são muito mais importantes do que os efeitos do agregado graúdo, as partículas cúbicas ou esféricas têm uma área superficial menor que as partículas alongadas. Conseqüentemente, partículas cúbicas ou esféricas requerem menos água para a trabalhabilidade [Shilstone, 1999; Dewar, 1992].

Partículas lamelares e alongadas afetam negativamente a trabalhabilidade, produzindo misturas pesadas. Para um dado teor de água, estas partículas mal formadas conduzem a misturas menos funcionais do que as partículas cúbicas ou esféricas. Inversamente, para uma dada trabalhabilidade, as partículas lamelares e alongadas, demandam mais água, afetando assim a resistência do concreto endurecido.

De acordo com Kandhal et al.(1991), a forma e a textura do agregado miúdo são mais importantes do que as do agregado graúdo para melhorar a estabilidade do concreto e aumentar a sua resistência à deformação permanente. PERDOMO E BUTTON descobriram que a forma arredondada e a textura lisa do agregado miúdo foram contribuintes significativos para o aumento da trabalhabilidade do concreto.

Neste capítulo, serão abordadas as principais características dos agregados, principalmente dos agregados miúdos, que podem ser afetadas pelos processos de britagem e suas influências nas propriedades dos concretos.

Tabela 3: Limites granulométricos do agregado miúdo (NBR 7211:2009)

Peneiras com abertura em mm (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem em massa retida acumulada na peneira para as diferentes zonas			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,50	0	0	0	0
6,30	0	0	0	7
4,75	0	0	5	10
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

### 2.2.3 Classificação

Segundo MEHTA & MONTEIRO(2008), os agregados podem ser classificados de acordo com a origem, dimensões das partículas ou massa específica. Classificados pela origem, os agregados podem ser naturais ou industrializados.

Os agregados naturais constituem a classe mais importante de agregados para a fabricação de concreto Portland. A areia de sílica natural é predominantemente usado como agregado miúdo, mesmo na maioria dos concretos leves. Os agregados minerais naturais são derivados de rochas de vários tipos e a maioria das rochas é composta de vários minerais. Um mineral é definido como um substância inorgânica de ocorrência natural, de composição química mais ou menos definida, e geralmente, com uma estrutural cristalina específica. Uma revisão elementar dos aspectos da formação da rocha e a classificação de rochas minerais são essencial para compreender por que alguns materiais são mais abundantemente usados como agregados do que outros, mas também as relações de microestrutura-propriedade no agregado.

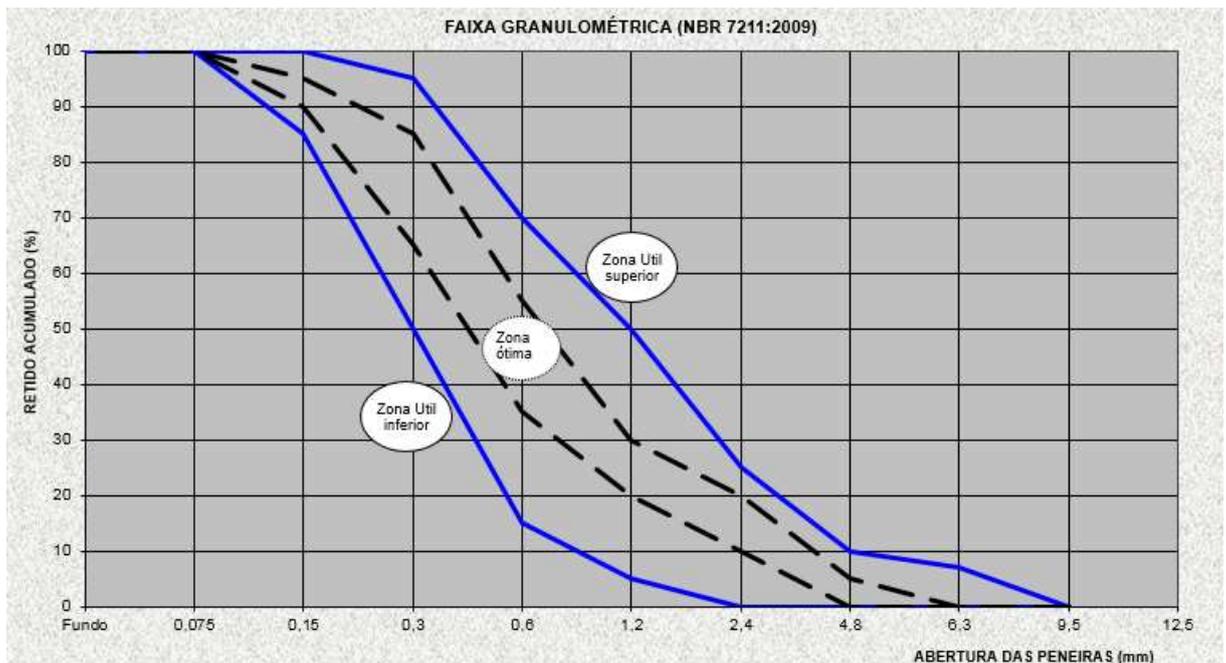
Classificação quanto à origem do material;

- Naturais: Constituem a classe mais importante de agregados para produção de concreto de cimento Portland, são encontrados na natureza na forma de areia de mina, areia de rio, seixo rolado, pedregulho, entre outros;
- Artificiais: Oriundos de rejeitos industriais, como a escória de alto forno, cinzas volantes, resíduos selecionados de rejeitos urbanos e concreto reciclado compreendem os agregados artificiais.

A classificação quanto à origem do material requer a definição dos seguintes termos:

- **Agregado:** Agregado é um material granular, com forma e volume variáveis, geralmente são inertes e com propriedades compatíveis para utilização na construção civil.
- **Agregado Natural:** Material pétreo, originado através de processos naturais de desintegração de rochas, utilizado como encontrado na natureza, podendo ainda ser classificado ou britado dependendo da aplicação;
- **Agregado Artificial:** São materiais produzidos e/ou gerados dentro de processos industriais, tais como a escória de alto-forno e escória de aciaria, ou fabricados especificamente com o objetivo de alto desempenho, como a argila calcinada (Cabral, 2005) e a argila expandida.
- **Agregado Reciclado** – Categoria de materiais que são reutilizados de diversas aplicações, a utilização deste agregado vem crescendo em interesses diversos, sejam eles por restrições ambientais impostas na exploração de agregados naturais e ou pela evolução das técnicas de reciclagem que tornam possíveis a produção de materiais reciclados dentro de padrões aceitáveis para sua aplicação. Outro ponto de destaque é a utilização crescente do resíduo gerado pela construção civil em locais com ausência de agregados naturais ou em áreas urbanas, como forma de redução do passivo ambiental gerado. No que se refere a esses agregados, Fernandes (2004), cita que a granulometria do agregado depende do processo de britagem utilizado.

- **Areia natural:** Agregado miúdo originado através de processos naturais ou artificiais de desintegração de rochas, na maioria das vezes, extraída do leito de rios;
- **Areia Industrial ou de britagem:** Agregado miúdo originado através de processos de britagem de rochas, podendo até mesmo ser obtido através de uma etapa de beneficiamento do pó de pedra, por processos com aero separadores, peneiramento, lavagem ou rebitagem.
- **Agregado miúdo:** agregado cujos grãos passam pela peneira de malha 4,75mm e ficam retidos na malha de 0,075 mm em ensaio de peneiramento, a Figura 2 mostra a distribuição granulométrica do ponto de vista ideal como descrito nos limites granulométricos do agregado miúdo (NBR 7211:2009).



**Figura 2: distribuição granulométrica para zona utilizável da areia artificial**

- **Agregado graúdo:** agregado cujos grãos passam pela peneira de malha 75mm e ficam retidos na malha de 4,75mm em ensaio de peneiramento.

Classificações quanto à massa específica dos agregados,

Os autores Helene e Terzian (1993) em seus estudos, relatam que a variação desta propriedade, podem apresentar alterações de volume por variação de umidade ou

mesmo reação com os álcalis do cimento, assim, por definição, MEHTA & MONTEIRO(2008), consideram como leve, os agregados que possuem massa unitária inferior do que  $1120\text{kg/m}^3$ , e estes são encontrados em vários concretos leves, e são produzidos pela britagem de rochas ígneas vulcânicas, para os mesmos autores, agregado de peso normal possui massa específica típica de  $2400\text{kg/m}^3$  e agregado pesado, são aqueles com massa específica substancialmente mais alta do que o agregado normal e são utilizados na produção de concreto pesado como por exemplo blindagem de radiação nuclear.

Em sua pesquisa WEIDMANN(2008), citou Neville(1997) em sua classificação mineralógica das principais rochas destinadas à produção de agregados para concreto, tabela 4.

**Tabela 4: Classificação mineralógica de rochas destinadas a produção de agregados**

<b>GRUPO BASALTO</b>	<b>GRUPO GRANITO</b>	<b>GRUPO GABRO</b>
Andesito	Gnaisse	Diorito básico
Basalto	Granito	Gnaisse básico
Porfiritos básicos	Granodiorito	Gabro
Diabásio	Granulito	Horneblenda
Epidiorito	Pegmatito	Norit
Lamprófiro	Quartzo-dolerito	Peridotito
Quartzo-dolerito	Sienito	Picrito
Espilito		Serpentinito
<b>GRUPO DAS ROCHAS PORFIRÍTICAS</b>	<b>GRUPO ARENITO INCLUINDO ROCHAS VULCÂNICAS</b>	<b>GRUPO QUARTZITO</b>
Aplito	Arcósio	Rochas sedimentares altamente silicosas com matéria orgânica vegetal
Dacito	Grauvaca	Arenitos quartzíticos
Felsito	Arenitos	Quartzito recristalizado
Granófiro	Tufos	
Lavas porfíricas	Silito	
Microgranito		
Rochas hipo-abissais	<b>GRUPO CALCÁRIO</b>	<b>GRUPO XISTO</b>
Quartzo-porfíricos	Dolomito	Filito
Riólito	Calcário	Xisto
Traquito	Mármore	Folhelho
		Rochas cisalhadas
<b>GRUPO SÍLICA</b>	<b>GRUPO HORNFELS</b>	
Calcedônia	Rochas de contato alteradas, exceto mármore	
Sílex		

Segundo MEHTA & MONTEIRO (2008), as rochas são classificadas de acordo com a origem em três grupos principais: ígneo, sedimentar e metamórfico. Estes grupos são ainda subdivididos de acordo com a composição mineralógica e química, textura ou tamanho de grão e estrutura cristalina, na Tabela 5 são apresentados os principais tipos de rochas utilizados como agregados (adaptado de Bariani Bernucci,2006).

#### Classificação quanto à distribuição dos grãos

A distribuição granulométrica dos agregados é uma das principais características que interfere no comportamento do concreto, seja em seu estado fresco ou em seu estado rígido, podendo influenciar, em quase todas as propriedades, incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação. A distribuição granulométrica dos agregados é determinada em sua grande maioria, por meio de análise por peneiramento, no Brasil regida pela NORMA MERCOSUL NBR NM 248. Nessa análise, basicamente, uma amostra seca de agregado é fracionada através de uma série de peneiras com aberturas de malha progressivamente menores, conforme ilustrado na Figura 3. Uma vez determinado o teor mássico de partículas retida em cada peneira, a distribuição é expressa em porcentagem mássica de cada tamanho retido.

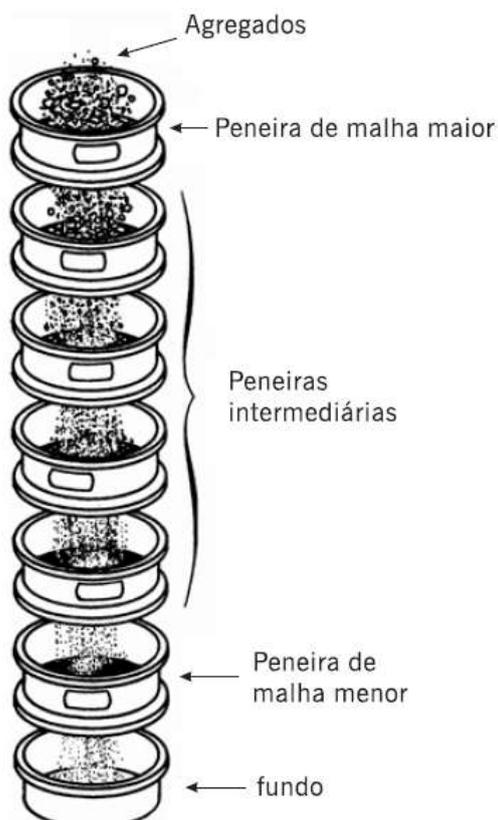


Figura 3: Análise por peneiramento, adaptado de BERNUCCI et al. (2006).

A distribuição granulométrica dos agregados, possui relação direta com o índice de vazios do agregado e influenciará na compacidade do concreto, de modo que, quanto menor o índice de vazios do agregado, menor o consumo de cimento no concreto.

#### **2.2.4 Características dos agregados**

De acordo com a ABNT NBR 7211:2009, os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e ou endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto, análises petrográficas realizadas de acordo com a ABNT NBR 7389, podem nos fornecer alguns dos subsídios necessários para o cumprimento destas condições.

Devem apresentar, ainda, resistência à compressão superior à da pasta, boa forma e boa graduação. Segundo SBRIGHI NETO (2005), existe uma série de características importantes que devem ser monitoradas na qualificação de agregados para produção do concreto.

##### **2.2.4.1 Composição granulométrica**

Muitos autores evidenciaram em seus trabalhos que as propriedades e o comportamento dos materiais preparados com agregados (sejam eles, concreto, argamassa ou cimento), dependem da natureza da rocha (mineralogia, propriedades mecânicas e físico-químicas), das condições de lavra e processamento (características geométricas e distribuição granulométrica) e das proporções que os agregados ocupam.

MEHTA E MONTEIRO (1994), defini composição granulométrica como a distribuição das partículas dos materiais, em sua grande maioria, granulares em várias dimensões, em geral, expressa em termos percentuais, numa série de peneiras normalizadas. Ainda segundo os mesmos autores, existem várias razões para a especificação de limites granulométricos dos agregados, sendo a mais importante a sua influência na trabalhabilidade e custo.

**Tabela 5: Tipos de rochas comumente usados como fonte de agregados**

Denominação Petrológica	Descrição
Andesito	Variedade de diorito vulcânico, de granulação fina
Basalto	Rocha básica de granulação fina, usualmente vulcânica
Conglomerado	Rocha constituída de blocos arredondados ligados por cimento natural
Diorito	Rocha plutônica intermediária, constituída de plagioclásio com hornblenda, augita ou biotita
Gabro	Rocha plutônica básica de granulação grossa, constituída de plagioclásio cálcico e piroxênio, algumas vezes com olivina
Gnaisse	Rocha riscada, produzida por condição metamórfica intensa
Granito	Rocha plutônica ácida, constituída principalmente de feldspatos alcalinos e quartzo
Calcário	Rocha sedimentar, constituída principalmente de carbonato de cálcio
Quartzito	Rocha metamórfica ou sedimentar constituída quase que totalmente por grãos de quartzo
Riolito	Rocha ácida, de granulação fina, usualmente vulcânica
Sienito	Rocha plutônica intermediária, constituída de feldspatos alcalinos com plagioclásios, hornblenda, biotita ou augita
Traquito	Variedade de sienito de granulação fina, usualmente vulcânico

SBRIGHI NETO (2005), propôs em seu trabalho algumas características que precisam ser avaliadas para qualificar agregados antes do uso na produção do concreto. O domínio destas características possui forte influência no processo de dosagem do concreto de cimento Portland (HELENE E TERZIAN, 1993), afetando suas características em todas as etapas desde sua etapa preliminar no estado fresco, até suas características em seu estágio final após endurecido.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 7211; 2009), a dimensão máxima característica, é uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária (representada na tabela 6) na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa

**Tabela 6: Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal) – fonte: (NBR 7211, 2009).**

SÉRIE NORMAL	SÉRIE INTERMEDIÁRIA
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 $\mu$ m	-
300 $\mu$ m	-
150 $\mu$ m	-

Em seus estudos, Neville (1997), propôs que a análise granulométrica seria melhor interpretada, se representada através de gráficos e, por este motivo, são usadas as curvas granulométricas. Porém, além dos requisitos físicos, aspectos econômicos devem ser considerados na escolha do melhor empacotamento de partículas, assim, o concreto deve ser produzido com materiais que possam ser disponibilizados com um custo baixo.

Para Edmeades e Hewlett (1998), a granulometria deve ser contínua, com partículas distribuídas uniformemente, ocupando todas as faixas analisadas, assim, a correta seleção da proporção e tamanho dos materiais particulados, produzirá um concreto mais compacto e resistente com um certo decréscimo de cimento utilizado, reduzindo de forma considerável, o risco de segregação.

Em seus estudos Neville (1997), cita que as propriedades do concreto rígido, completamente adensado, com uma mesma relação a/c, independe da granulometria do agregado, contudo, a granulometria é extremamente importante até o ponto em que pode oferecer certa influência sobre a trabalhabilidade. Desta forma, a granulometria do agregado exercer importante influência sobre: a demanda d'água, o volume relativo ocupado pelos agregados, pela trabalhabilidade do concreto e pela

forte tendência à segregação apresentada quando duas peneiras adjacentes quaisquer não possui 13% do total combinado de agregado.

Fennis (2012), concluiu em seu trabalho que a distribuição ideal do tamanho de partícula depende das características de cada partícula de agregado e, portanto, varia com cada tipo de concreto. Por exemplo, quando uma areia arredondada é combinada com agregados grosseiros reciclados, a distribuição de tamanho de partícula ótima será diferente de uma mistura com areia angular e agregados grosseiros arredondados. Portanto, uma única curva de otimização ideal não leva inevitavelmente à mistura com a maior densidade de empacotamento.

Diversos autores relacionam a otimização do empacotamento de partículas de concreto com várias vantagens para as propriedades do concreto, tanto em seu estado fresco como em seu estado rígido. A adição de partículas finas a uma estrutura de partícula, ajuda a preencher os vazios deixados na estrutura pelas partículas graúdas, deixando apenas um espaço mínimo para a água.

Carneiro (1999) menciona que, otimizando o empacotamento dos agregados, pode-se produzir concreto com grande compacidade e resistência mecânica, quando comparando aos testes em concretos com diferentes teores de cimento, foi observado que para valores próximos de resistências, o agregado com melhor graduação, requer menor quantidade de cimento, em torno de 12% menos, se comparado ao concreto com agregado de distribuição granulométrica natural.

Ainda segundo o mesmo autor, com a otimização do empacotamento, favorece o deslizamento das partículas maiores entre as menores, reduzindo o consumo da água de amassamento para uma mesma trabalhabilidade estipulada.

Kwan e Mora (2002) argumentam que uma densidade de empacotamento mais alta conduz a uma menor proporção de vazios e, portanto, é necessária uma quantidade menor de pasta de cimento.

#### **2.2.4.2 Forma das partículas**

MEHTA E MONTEIRO (2008), propuseram que a forma e a textura superficial das partículas de agregado influenciam as propriedades das misturas de concreto fresco (trabalhabilidade), mais do que no concreto endurecido. Em comparação com partículas lisas e arredondadas, partículas rugosas, angulares e alongadas requerem mais pasta de cimento para produzir misturas de concreto trabalháveis, aumentando

assim o custo. A forma da partícula refere-se a características geométricas, tais como arredonda, angular, alongada ou lamelar.

A avaliação da forma da partícula de agregado é importante, porque a forma pode influenciar as características de mistura da massa, afetar a adesão entre o agregado e a pasta de cimento e afetar o intertravamento das partículas de agregado na matriz, que são efeitos críticos sobre as propriedades mecânicas do concreto (JOHN, POOLE e SIMS, 1998).

A forma e a textura do agregado miúdo podem exercer forte influência na demanda d'água em concretos, agregados provenientes de rios, depósitos eólicos e zonas marítimas, são mais regulares e arredondados e, normalmente, apresentam melhor desempenho em seu estado fresco. Por outro lado, areias provenientes do processo de britagem, encontra-se uma grande quantidade de grãos alongados ou lamelares que ocasionalmente levam a produção de um concreto muito pesado e áspero.

JENNINGS (1988) comenta que agregados angulares com superfícies ásperas proporcionam melhor entrosamento com a pasta de cimento que agregados lisos e arredondados, relação que justificaria certo ganho de resistência apresentado nos traços onde a composição do agregado fino possuía maiores teores de agregado miúdo artificial que o agregado natural.

Para NEVILLE(1997), a área específica total do agregado miúdo, está diretamente relacionada com sua granulometria, sendo influenciada pela quantidade de partículas com diâmetros menores que  $600\ \mu\text{m}$  e deve haver uma certa quantidade de partículas menores que  $300\ \mu\text{m}$  para que a seja produzido um concreto satisfatoriamente trabalhável.

Outros autores, relacionaram a forma das partículas dos agregados com o comportamento do concreto, pois demonstravam certa influência na trabalhabilidade, no ângulo de atrito interno, e no estado fresco, isto é, nas propriedades que são regidas pela demanda de água.

De acordo com a recomendação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 7389-1; 2009), a forma dos grãos, deve ser avaliada visualmente, a olho nu ou com auxílio de instrumento óptico (lupa ou estereomicroscópio), relatando-se o grau de esfericidade (alto ou baixo) e o grau de arredondamento (anguloso, subanguloso subarredondado ou arredondado). A Figura 4 orienta como avaliar a forma dos grãos. Agregados miúdos artificiais geralmente apresentam forma mais angular e textura superficial mais áspera que agregados miúdos naturais, que normalmente possui

forma arredondada devido as interações com o tempo ao longo dos anos e com textura superficial lisa. Outra particularidade dos agregados miúdos artificiais, é que eles possuem grande quantidade de material pulverulento (diâmetro de partícula inferior a 75  $\mu\text{m}$ ) e, conseqüentemente, grande área superficial. Devido as diferenças apresentadas, concretos produzidos com agregados artificiais ou britados, geralmente apresentam maior demanda de água e conseqüentemente menor trabalhabilidade quando comparado ao concreto produzido com agregados naturais (WESTERHOLM et al., 2008). O mesmo autor em seu trabalho evidencia que argamassas preparadas com agregados miúdos artificiais apresentam viscosidade mais alta que argamassas preparadas com agregados miúdos naturais. Esse efeito pode ser atribuído à grande quantidade de material pulverulento e à forma irregular dos agregados miúdos artificiais.

Gonçalves *et al.* (2007) revela em seus estudos que para altas relações a/c, a consistência da argamassa independe das características de forma do agregado miúdo. Entretanto, para maiores frações de sólido na mistura, tem-se evidente influência da forma das partículas finas sobre a consistência.

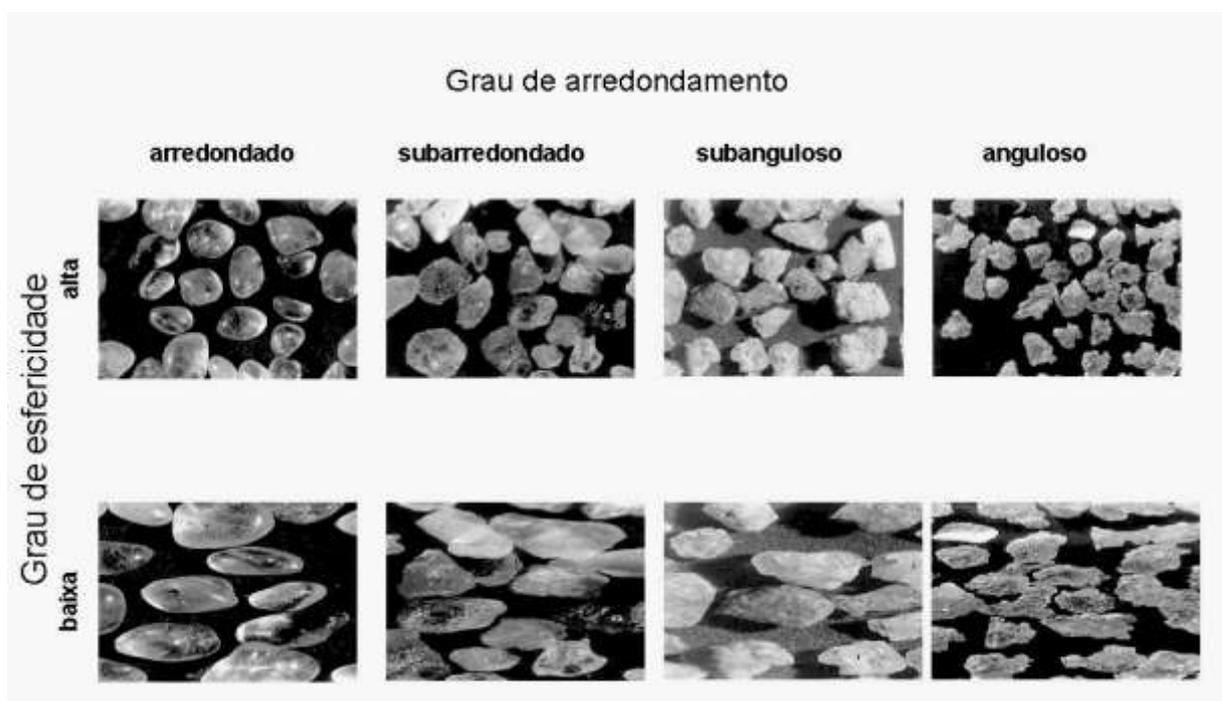


Figura 4: Esquema ilustrativo para orientar a avaliação da forma dos grãos de agregado (Adaptado de NBR 7389-1:2009)

Em pesquisa feita por KENITIRO (1973 *apud* FONSECA, 2002), definem esfericidade, como uma grandeza que tenta expressar numericamente o grau de aproximação de forma de uma partícula qualquer, com aquela de esfera perfeita.

A Figura 5 possibilita comparar visualmente o grau de arredondamento e de esfericidade: quanto maior o grau de esfericidade, menos alongada é a amostra; quanto maior o arredondamento, mais lisa é a amostra. Logo, quanto mais próximo do valor unitário, melhor será o empacotamento da amostra.

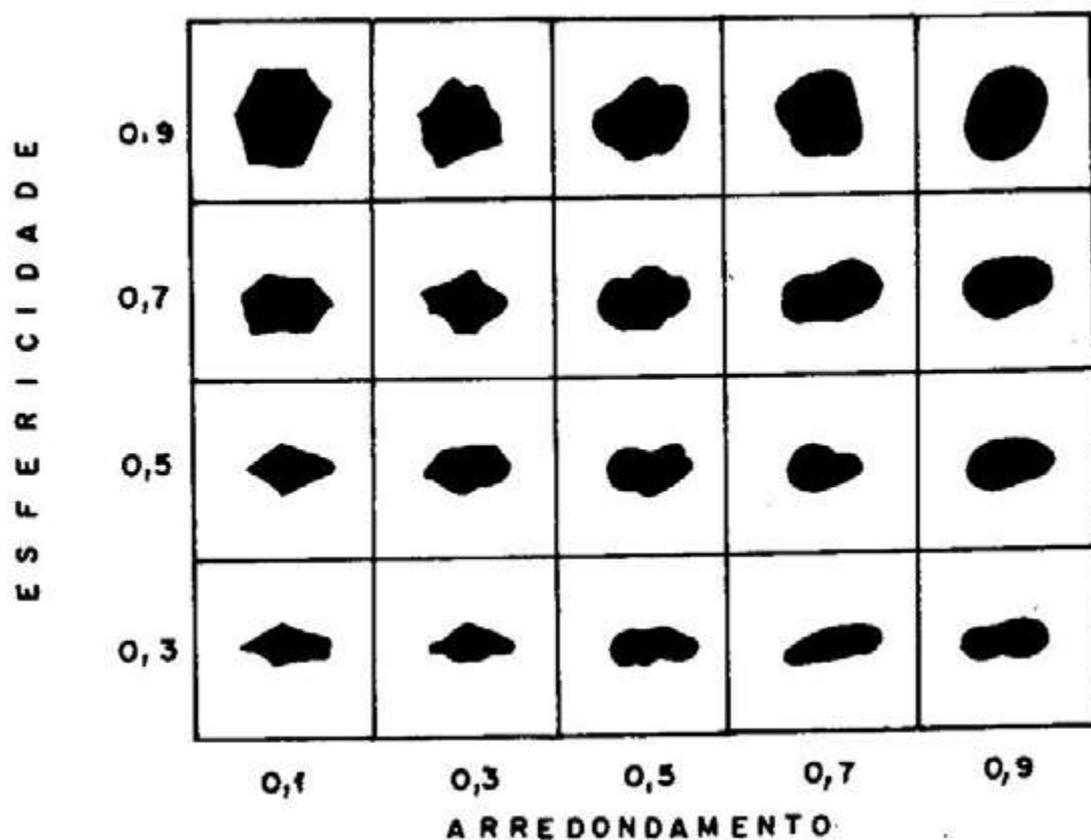


Figura 5: Comparação visual de arredondamento e esfericidade do grão de areia (Adaptado de FONSECA;2002)

Em seu trabalho Wadell (1973 *apud* FONSECA, 2002), a esfericidade pode ser determinada empiricamente pela Equação 1.

$$Esfericidade = \sqrt[3]{\frac{V_{particula}}{V_{esfera}}} \text{-----Equação 1}$$

Onde:

V partícula: volume do grão do agregado analisado

V esfera: volume da esfera circunscrita ao grão do agregado

Num contexto geral, quanto mais alongadas e ásperas forem as partículas de agregados, maior será o consumo de pasta de cimento para cobrir os grãos e compensar dificuldades no movimento dessas partículas, afim de produzir concretos de mesma trabalhabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Logo, a forma dos agregados terá influência direta na trabalhabilidade do concreto, e uma mistura preparada com agregado anguloso demandará mais água para um mesmo abatimento de tronco de cone, quando comparado a um concreto preparado com agregados de maior esfericidade (GUIMARÃES, 2005).

### 2.2.5 Massa Específica e Massa Unitária

Com o objetivo de colocar em proporção a mistura de concreto, é desejável conhecer o espaço ocupado pelas partículas de agregados, inclusive os poros existentes dentro das partículas. Em seu trabalho Niebel(2008), evidencia a importância da massa específica do concreto, visto que pode ajudar a avaliar, mesmo que indiretamente o teor de ar incorporado na mistura, e tal parâmetro decresce quando se aumenta a composição de agregados mais arredondados influenciando diretamente na massa específica do concreto. DAMO (2011), defende a necessidade de conhecer o volume ocupado pelo agregado, incluindo o volume dos poros presentes em cada material.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR NM 52; 2009), podemos definir massa específica de três maneiras, sendo elas:

- **Massa específica:** como a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis, para muitas rochas esta grandeza pode variar de 2600 a 2700kg/m<sup>3</sup>.
- **Massa específica aparente ou unitária:** como a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis.
- **Massa específica relativa:** como a relação entre a massa da unidade de volume de um material, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis, a uma temperatura determinada, e a massa de um volume igual de água destilada, livre de ar, a uma temperatura estabelecida. A massa específica relativa é uma grandeza adimensional, devendo ser expressa sempre em função da temperatura.

MEHTA e MONTEIRO(2008), publicaram que para fins de dosagem de concreto, não seria necessário determinar a massa específica real de um agregado, seria de mais valia conhecer o volume ocupado pelas partículas incluindo os poros existentes, outra definição que se faz necessária é o fenômeno de massa unitária, uma vez que o volume é ocupado pelo agregado e pelos vazios.

Bucher (1986 *apud* Niebel 2008) identificaram que existem três grupos de fatores que podem influenciar de alguma forma as propriedades dos agregados para atender às exigências técnicas dos concretos:

- Propriedades funcionais – massa específica aparente, dimensão máxima característica;
- Propriedades básicas – resistência mecânica, resistência à deformação, resistência química, resistência ao transporte de energia; e, por último,
- Propriedades secundárias – distribuição granulométrica, textura superficial, índice de forma e os contaminantes; materiais pulverulentos, matéria orgânica, material leve, material argiloso e sais nocivos.

Segundo definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR NM 45; 2006), massa unitária é a relação entre a massa do agregado não compactado lançado num recipiente e o volume desse recipiente, em sua grande maioria, esta unidade é utilizada para converter unidades de massa em unidades de volume, sendo sua aplicação típica em centrais dosadoras de concreto o controle de recebimento e estocagem de agregados em volumes. A massa unitária também pode ser utilizada como parâmetro de classificação do agregado quanto à densidade, um valor aproximado para os agregados comumente usado para o concreto de peso normal, varia de 1300 a 1750kg/m<sup>3</sup> (MEHTA e MONTEIRO 2008).

### **2.2.6 Resistência a compressão e Módulo elástico**

Segundo Souza (2010 *apud* Rosário 2013), porosidade, permeabilidade e absorção, são propriedades dos agregados que exercem forte influência sobre o concreto, uma vez que são responsáveis pela aderência entre o aglomerante e o agregado, conseqüentemente influenciam na resistência à abrasão e estabilidade química.

Em seus estudos MEHTA e MONTEIRO (2008) correlacionam a porosidade do agregado com possíveis variações nas propriedades de resistência à compressão, resistência à abrasão e no módulo elástico do agregado. Os mesmos autores relatam que os valores típicos da resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico para a maioria dos agregados de granito, basalto, rochas plutônicas, flint, arenito quartzítico e calcário denso estão na gama de 210 a 310 MPa e 70 a 90 GPa, respectivamente. No que diz respeito às rochas sedimentares, a porosidade varia numa vasta gama, assim como a resistência à compressão e as características relacionadas.

De um modo geral, agregados naturais, são comumente usados para fazer concreto de peso normal, e são geralmente densos e resistentes. Para NEVILLE(1997), uma massa unitária elevada, nos remete a partículas com menor número de poros vazios a ser preenchidos por partículas menores (em particular o cimento).

### 2.2.7 Substâncias deletérias

Substâncias deletérias são aquelas que estão presentes como constituintes em proporções menores no agregado miúdo ou graúdo, mas são capazes de afetar negativamente o concreto em seu estado fresco (trabalhabilidade), e em seu estado rígido. A tabela 7 adaptada da Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 7211; 2009), limita a contaminação com estas substâncias.

**Tabela 7: Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado miúdo com relação à massa do material**

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

### 2.2.8 Absorção e umidade superficial

Poros internos presentes nas partículas dos agregados estão relacionados com a massa específica do agregado, estes poros e a capacidade de absorção do agregado, podem influenciar nas propriedades como a aderência da pasta de cimento. Quando estes poros são preenchidos, diz-se que ele se encontra saturado e com a superfície seca.

MEHTA e MONTEIRO (2008), apresentam em seus estudos as condições de umidade em que uma partícula de agregado pode existir, a figura 6 mostra estas condições, mencionam ainda que dependendo da granulometria e do teor desta umidade, pode ocorrer aumento do volume aparente da areia fina, como mostra a figura 7.

<b>Condição</b>	Seca em estufa	Seca ao ar	Saturada superfície seca	Saturada ou úmida
				
<b>Umidade Total</b>	Nenhuma	Menor do que a absorção potencial	Igual à absorção potencial	Maior do que a absorção

Figura 6: Agregado em várias condições de umidade (Adaptado de MEHTA e MONTEIRO;2008)

Conhecer o teor de umidade dos agregados, principalmente dos miúdos, devido ao fenômeno do inchamento ( ou bulking) é vital para tecnologia do concreto, essa água presente nos poros, influenciam diretamente a água do traço, tendo influência direta na trabalhabilidade, e na resistência estabelecida na carta traço de dosagem. Em sua grande maioria, as areias são disponibilizadas nas centrais dosadoras em condições elevadas de umidade, relacionadas ao processo produtivos das mesmas, e de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 12655-2015), grandes variações podem ocorrer quando a medida adotada para os agregados for em volume, nestes casos, deve-se adotar para o cálculo da resistência de dosagem o desvio-padrão(Sd) máximo, assunto que será detalhado nos próximos tópicos.

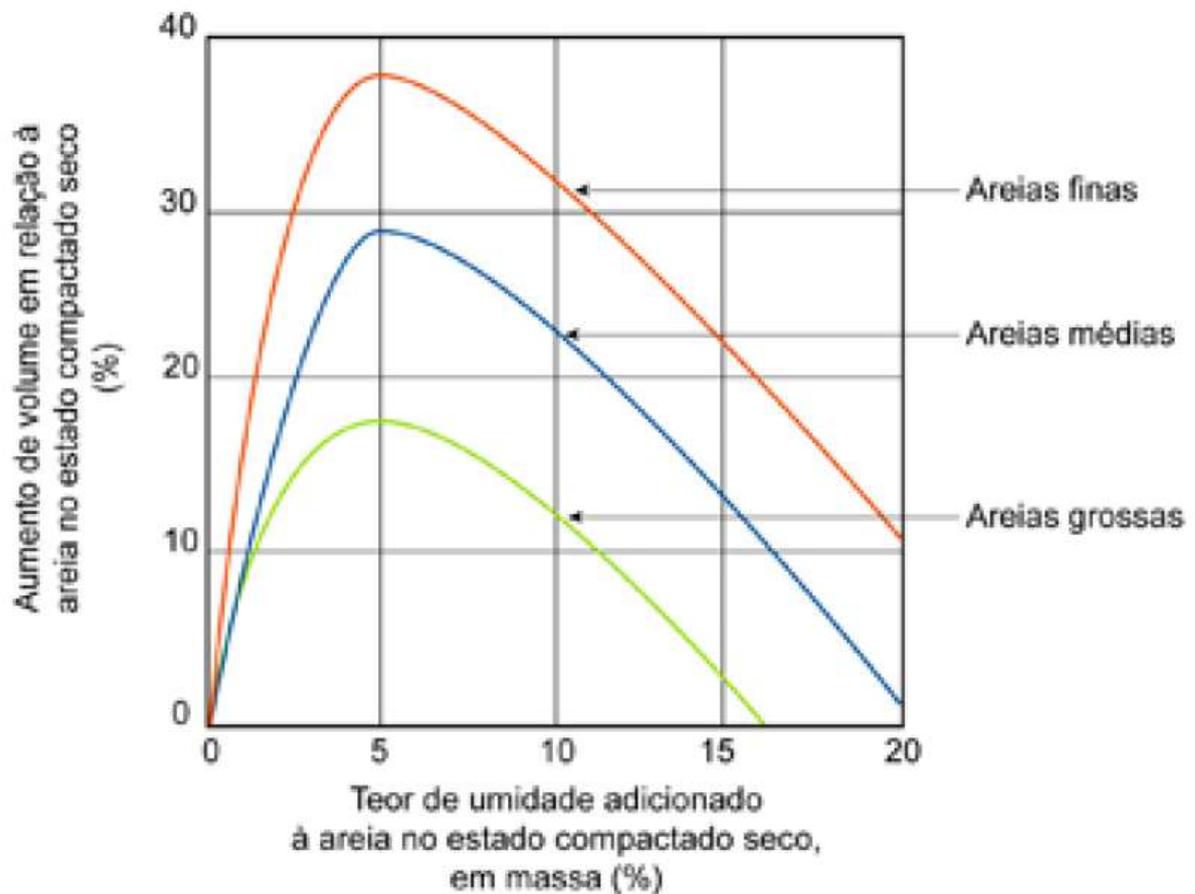


Figura 7: Inchamento devido à umidade no agregado miúdo (Adaptado de MEHTA e MONTEIRO; 2008)

### 2.3 Cimento Portland

Para Coelho (2012), cimento é um material inorgânico que, em contato com a água, produz uma reação de hidratação como liberação de energia sob forma de calor, que contribui para formação dos cristais, ganhando assim resistência mecânica e estabilidade.

De acordo com a definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 5732-1991), Cimento Portland, é um Aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozzolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado Cimento Portland de alto forno, e a norma vigente (NBR 5735-1991) o definiu como um aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e escória granulada de alto forno

moídos em conjunto ou em separado, a mesma norma fixa a adição de escória de alto forno ao cimento num teor mássico entre 35 e 70% da massa total de aglomerante, vale ressaltar que o cimento utilizado neste trabalho continha 60% de adição e suas características físicas/mecânicas são limitadas por norma de acordo com a Tabela 8.

**Tabela 8: Boletim de Ensaios de Cimento Portland – Conforme definido em norma.**

Ensaio	Métodos de ensaio	Limites da NBR 5737/91
Finura - resíduo na peneira #200 (%)	NBR 11579/12	≤ 8,0 %
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 23/01	N/A
Área específica (cm <sup>2</sup> /g)	NBR NM 76/98	N/A
Água da pasta de consistência normal (%)	NBR NM 43/03	N/A
Início de pega(min)	NBR NM 65/03	≥ 60
Fim de pega (min)	NBR NM 65/03	≤ 600
Expansibilidade de Le Chatelier - a quente (mm)	NBR 11582/12	≤ 5mm
<b>Resistência à compressão (MPa)</b>		
Idade (dias)	Métodos de ensaio	Limites da NBR 5735/91
3	NBR 7215/96	≥ 12,0 MPa
7	NBR 7215/96	≥ 23,0 MPa
28	NBR 7215/96	≥ 40,0 MPa

Fonte: Votorantim Cimentos (Valores Médios)

KIHARA ET ALII (1990 apud CENTURIONE;1993), definem como clínquer de cimento Portland, material sinterizado e pelotizado, resultante da calcinação, em fornos com temperatura aproximada de 1450°C, de uma mistura de calcário e argila, podendo eventualmente conter alguns componentes corretivos, como silicosos, aluminosos ou mesmo ferríferos.

NEVILLE(2015) descreve em seu livro que, o uso de materiais de cimentícios é bem mais antigo, e nos chama atenção para patente de um pedreiro e construtor chamado Joseph Aspdin em 1824, que preparava o “cimento Portland” pelo aquecimento de uma mistura de argila finamente moída e calcário em um forno até extinção do CO<sub>2</sub>, processo bem diferente dos atuais, o nome “cimento Portland” atribuído originalmente devido a semelhança em cor e qualidade a um calcário extraído em Dorset, é utilizado até os dias atuais para descrever o cimento obtido pela queima à temperatura de clinquerização de materiais calcários e argilosos.

De acordo com a definição da ASTM C 150 (*apud* MEHTA e MONTEIRO;2008), cimento Portland como um cimento hidráulico produzido pela moagem de clínqueres constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio como uma adição intermediária. Definiu ainda que Clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de um material sinterizado que é produzido quando uma mistura de matérias-primas de composição pré-determinada é aquecida em altas temperaturas.

### **2.3.1 Adições Minerai**

As adições minerai são empregadas em substituição ao cimento, cujos teores usuais de substituição são encontrados na tabela 8.

Em seus estudos GONÇALVES (2005), evidencia que o uso de adições minerai em substituição parcial ao cimento pode gerar benefícios aos materiais cimentíceos, dentre eles, resistência a ataque por sulfatos.

Melo em seu trabalho, evidencia a existência de oito tipos básicos de cimentos normalizados e que são comercializados com diferentes subtipos, totalizando mais de duas dezenas de opções e com várias aplicações (BATTAGIN; 2011 *apud* MELO;2012). A escolha do melhor tipo de cimento para determinado serviço requer o bom conhecimento das suas características. A Tabela 9 apresenta um resumo dos diversos tipos de cimento comercializados no mercado brasileiro

**Tabela 9: Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil.**

Nome Técnico do cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer +gesso	Escória	Pozolana	Fíler Calcário
Comum	CP I	25, 32, 40	100	0	0	0
Comum com Adição	CP I-S	25, 32, 40	99 - 95	0	1 - 5	0
Composto com escória	CP II-E	25, 32, 40	94 - 56	6 - 34	0	0 - 10
Composto com pozolana	CP II-Z	25, 32, 40	94 - 76	0	6 - 14	0 - 10
Composto com Fíler	CP II-F	25, 32, 40	94 - 90	0	0	6 - 10
Alto-forno	CP III	25, 32, 40	65 - 25	35 - 70	0	0 - 5
Pozolânico	CP IV	25, 32	85 - 45	0	15 - 50	0 - 5
Alta resistência inicial	CP V ARI	-	100 - 95	0	0	0 - 5
Resistente a sulfatos	RS	25, 32, 40	A composição depende do tipo original do qual é derivado			
Baixo calor de Hidratação	BC	25, 32, 40				
Branco estrutural	CPB	25, 32, 40	-	-	-	-

(FONTE: MELO;2012)

### 2.3.1.1 Classificação das Adições Minerais

Segundo Dal Molin (2005; apud PILAR; 2012), as adições minerais podem ser classificadas em três grandes grupos, de acordo com sua ação físico-química:

- Material pozolancio;
- Material cimentante;
- Fíler.

Pozolanas são materiais de origem natural ou artificial, contendo preponderantemente em sua constituição química sílica em forma ativa (MORAES 2001).

MEHTA e MONTEIRO(2008); NEVILLE(2015) descrevem em seus livros de forma similar, que a pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso, que por si só possui pouca ou nenhuma atividade cimentante, mas que, numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes. NEVILLE(2015), destaca ainda que a sílica deve ser amorfa(vítrea), visto que a sílica cristalina tem baixíssima reatividade.

As pozolanas naturais mais comuns são as cinzas vulcânicas, terras diatomáceas calcinadas e argila calcinada, em sua grande maioria são derivadas de rochas e minerais vulcânicos, exceto terra de diatomáceas. As pozolanas artificiais mais utilizadas são a sílica ativa, e materiais de subproduto indústrias, como as cinzas de carvão mineral proveniente de termoelétricas (cinza volante), resíduos agrícolas como palha e casca de arroz.

Em seu trabalho TASHIMA(2006), refere-se a pozolanas naturais como todos os materiais pozolânicos derivados de rochas ou minerais vulcânicos que passam por processo de britagem, moagem, classificação, e que, geralmente, são ativados termicamente, pois apresentam impurezas que diminuem a sua atividade pozolânica. A produção de cimento com teores elevados de adições minerais como por exemplo pozolanas, possibilita preservação das jazidas, contribui para redução considerável no consumo de energia na produção do clínquer e propicia a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, uma vez que diminui a produção de clínquer e, conseqüentemente, a queima de combustíveis fósseis.

Atualmente, a cinza volante é o principal resíduo industrial no mundo, com um nível de produção anual de 500 milhões de toneladas, tendo como maiores produtores de cinzas os países China, Índia, Estados Unidos, Rússia, Alemanha, África do Sul, e Reino Unido (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Material cimentante é um material que forma produtos, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), sem necessariamente entrar em contato com o hidróxido de cálcio, Ca(OH)<sub>2</sub>, como por exemplo, a escória granulada de alto-forno (ALMEIDA, 2008).

Escória de alto-forno é definida pela ASTM C125-16 como produto não metálico, constituído essencialmente por silicatos e alumino-silicatos de cálcio e outras bases, que é desenvolvido em estado fundido, simultaneamente com o ferro gusa num alto-forno.

A escória de alto-forno é um subproduto não-metálico da produção de ferro-gusa em altos-fornos, obtido pela reação, em elevadas temperaturas, do minério de ferro, fundentes e cinzas de carvão vegetal ou carvão mineral (coque). Este material constitui-se de uma mistura de cal, sílica e alumina, ou seja, os mesmos óxidos que constituem o cimento Portland, porém em proporções diferentes (NEVILLE;1982 apud FONSECA;2010),

Diferente das pozolanas, que não apresentam comportamento hidráulico, a escória de alto-forno pode reagir diretamente com a água, necessitando apenas de um meio

alcalino para que essa reação ocorra. Por esta razão, a escória de alto-forno é considerada um material com propriedades hidráulicas latentes, diferentemente dos materiais pozolânicos que necessitam da presença adicional de óxido de cálcio para se combinarem quimicamente.

Em sua grande maioria, os autores concordam que a composição química da escória está diretamente relacionada aos elementos que contribuem na sua formação, COUTO (2010) cita em seu trabalho a ganga (material inerte do minério), os fundentes (substâncias ou materiais que auxiliam a fusão dos metais) e as cinzas do combustível utilizado (carvão vegetal ou coque), a mesma autora referenciando Starling, et al(1990), descreve que os principais componentes da escória de alto-forno são: sílica -  $\text{SiO}_2$ , alumina -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ambos provenientes da ganga) e cal -  $\text{CaO}$  (proveniente do calcário utilizado como fundente).

Além da composição da escória, KELES (2011) relaciona as propriedades fundamentais da escória com mais de um parâmetro, referenciando sua hidraulicidade, (capacidade ou não de alguns de seus óxidos reagirem em meio saturado, formando sais insolúveis e estáveis) com sua forma de obtenção, seja no estado sólido vítreo resfriado ou no estado sólido cristalino resfriado.

Este trabalho fará abordagem apenas das escórias vítreas, ou seja, aquelas que mantêm as propriedades hidráulicas desejadas para a indústria cimenteira, pois se comportam termodinamicamente instáveis e hidraulicamente latentes podendo ser ativadas, em função de sua granulometria em meio aquoso. As escórias cristalinas, aquelas obtidas por resfriamento lento, não serão abordadas neste trabalho, por se comportarem na grande maioria das vezes, como substância termodinamicamente estável, quando comparadas às escórias vítreas.

NEVILLE(2015) descreve em seu livro, que fíler é um material finamente moído, aproximadamente da mesma finura do cimento, que podem intensificar a hidratação do cimento Portland, agindo como pontos de nucleação, devido à ação do fíler ser predominantemente física, deve existir compatibilidade com o cimento.

Por muito tempo, o fíler calcário foi considerado um material inerte, porém, sabe-se que o fíler calcário contribui no processo de hidratação do cimento nas primeiras idades devido ao efeito físico (compactação e nucleação heterogênea). Segundo J. Baron (1997 apud CABANAS;2011), foi demonstrado por calorimetria que a hidratação do silicato tricálcio( $\text{C}_3\text{S}$ ) é bem mais rápida na presença de pó calcárico, não porque haja alguma reação química, mas devido a um efeito de ordem física.

### 2.3.2 Composição Química do Cimento Portland

Basicamente os materiais mais utilizados na produção de cimento, consistem essencialmente, em calcário, sílica, alumina e óxido de ferro, esses compostos interagem no interior do forno, formando produtos mais complexos, que são considerados os principais constituintes do cimento, e suas abreviaturas clássicas estão identificadas na tabela 10.

**Tabela 10: Principais compostos do cimento Portland(NEVILLE(2015))**

Nome do Composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

CENTURIONE(1993) faz menção aos mesmos produtos mais complexos, atribuindo a resistência e tenacidade do clínquer ao material intersticial constituído por por aluminatos e ferroaluminatos de cálcio que ao se solidificarem, formam uma estrutura de cristais entrelaçados ou mesmo uma massa vítrea que envolve os silicatos (alita e belita).

MARINGOLO (2001) relata que o clínquer Portland, mesmo sendo um material sintético, pode ser visto como um tipo de rocha resultante de um processo metamórfico termal em sistema fechado e ambiente oxidante, agindo sobre um pacote de calcário e argila.

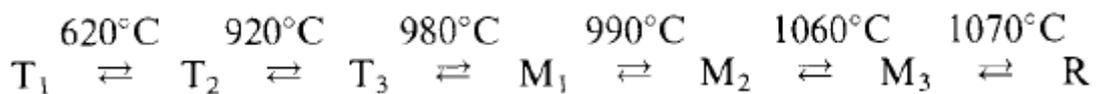
MEHTA e MONTEIRO(2008), afirmam que Silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) e silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ), são os dois silicatos hidráulicos comumente encontrados no cimento Portland industrial. Estes polimorfos  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$  são conhecidos como alita e belita, respectivamente.

#### 2.3.2.1 Silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ), Alita

O silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) é o principal composto do clínquer, e tem participação entre 40 e 70% na sua composição, com importante papel na resistência mecânica do cimento após hidratação e cura.

Em seu trabalho Taylor (1997), usando Tecnologia de Difração de Raios-X e outros métodos, mostrou que cerca de 70% do Silicato tricálcico ( $C_3S$ ) reagiu tipicamente em 28 dias e praticamente 100% em 1 ano, e que os produtos são hidróxido de cálcio (CH) e um silicato de cálcio hidratado quase amorfo, chamado CSH, tendo as propriedades de um gel rígido.

Segundo CENTURIONE (1993), CHOTOLI (2006), a forma mais comum para obtenção de  $C_3S$ , ocorre por meio da reação sólido-sólido entre cristais de CaO livre e belita ( $C_2S$ ), onde a reação se processa por difusão iônica, sendo acelerada pela fase fundida. Num primeiro estágio, ocorre a reação do quartzo com o CaO disponível, formando os cristais de  $C_2S$  que, posteriormente, reagem com o CaO novamente para originar cristais de  $C_3S$ . Taylor(1997) estudando o clínquer, percebeu que ao ser aquecido, o  $C_3S$  puro sofre uma série de transições de fase reversíveis, que foram detectadas por uma combinação de DTA (análise térmica diferencial), DRX (Difração de Raios X).



(T=Triclínico, M= Monoclínico, R=Romboédrico)

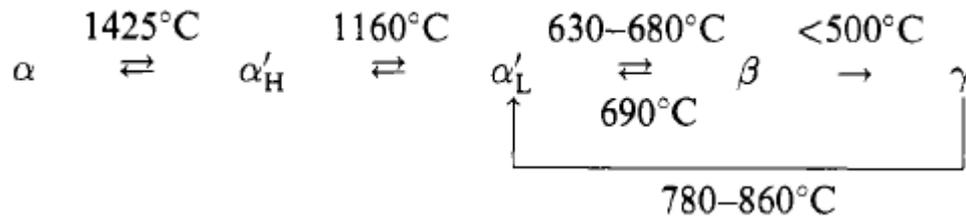
### 2.3.2.2 Silicato dicálcico( $C_2S$ ), Belita

Silicato dicálcico( $C_2S$ ) ou belita, constitui 15-30% do clínquer de cimento Portland normal(Taylor,1997), possui cinética de hidratação lenta, bem como, baixo calor de hidratação liberado, apresenta pouca contribuição nas resistências iniciais, mas contribui significativamente com o aumento da resistência em idades avançadas.

CHOTOLI (2006), definiu belita ( $Ca_2SiO_4$  ou  $C_2S$ ) como uma série de solução sólida do silicato dicálcico impuro, geralmente denominada  $C_2S$  e contribui entre 15 e 30% da composição do clínquer. Possui cinética de hidratação lenta e, portanto, contribui de forma mais significativa para o desenvolvimento da resistência mecânica em longas idades.

Para CENTURIONE (1993) belita é uma solução sólida do silicato dicálcico, com quatro variedades polimórficas, estabilizadas pela presença de óxidos em sua estrutura cristalina, com contribuição significativa nas resistências em idades

avançadas. Taylor(1997) evidenciou em seus estudos, com o apoio da técnica DRX (Difração de Raios X), a existência de cinco polimorfos de  $C_2S$  em condições típicas.



( $\alpha$ -polimorfo trigonal;  $\alpha'_{\text{H}}$ ,  $\alpha'_{\text{L}}$  &  $\gamma$ -polimorfo ortorrômnicos;  $\beta$ -polimorfo monoclinico)

As estruturas são construídas a partir de  $\text{Ca}^{2+}$  e íons  $\text{SiO}_4^{4-}$ . Os arranjos destes íons são muito semelhantes nos polimorfos ( $\alpha$ ,  $\alpha'_{\text{H}}$ ,  $\alpha'_{\text{L}}$  e  $\beta$ ), mas diferentes  $\gamma$ . Como com  $C_3S$ , os polimorfos de temperatura mais alta normalmente não podem ser preservados no resfriamento, a menos que estabilizada por íons substituintes,  $\beta$   $C_2S$  é bem menos denso do que os outros polimorfos, e isso faz com que os cristais ou massas sinterizadas  $\beta$   $C_2S$  se quebrem (TAYLOR, 1997).

### 2.3.2.3 Aluminato tricálcico( $C_3A$ )

Aluminato tricálcico( $C_3A$ ), possui cinética de hidratação rápida, elevado calor de hidratação liberado quando em contato com a água, responsável por controlar a pega inicial e o endurecimento da pasta, e responsável pela baixa resistência ao ataque de sulfatos.

O aluminato tricálcico ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ) cristaliza-se no sistema cúbico e não exibe polimorfismo. A estrutura cristalina é constituída de íons  $\text{Ca}^{2+}$  e anéis de seis tetraedros  $\text{AlO}_4$ , de fórmula  $(\text{Al}_6\text{O}_{18})^{18-}$  (MONDAL e JEFFERY, 1975, TAYLOR,1998 apud MARINGOLO, 2001). Esses anéis estão plissados de forma que os átomos de alumínio se posicionam próximos a seis dos cantos de um cubo (Figura 8). A coordenação daqueles próximos aos cantos é octaédrica, enquanto a dos localizados no centro é irregular, com 5 ou 6 oxigênios

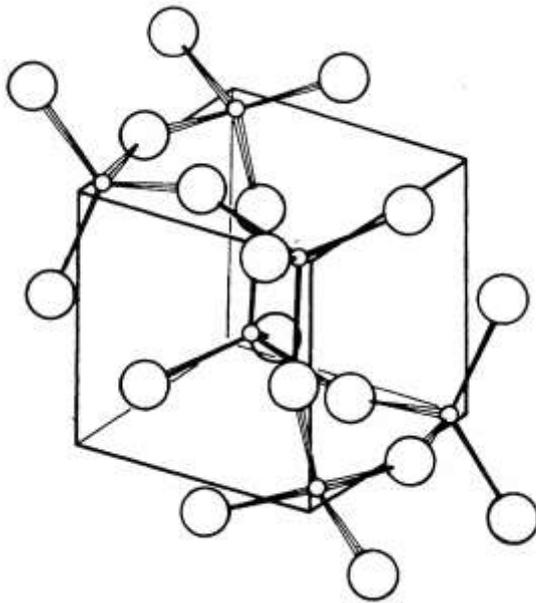


Figura 8: Anel de  $\text{Al}_6\text{O}_{18}$  na estrutura do  $\text{C}_3\text{A}$  (TAYLOR, 1998 apud MARINGOLO, 2001), mostrando as situações dos átomos de Al próximos aos cantos de um cubo.

#### 2.3.2.4 Ferro aluminato tetracálcico, $\text{C}_4\text{AF}$

Ferro aluminato tetracálcico ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ),  $\text{C}_4\text{AF}$ , está entre os componentes mais comuns do clínquer, conhecido como brownmélite, usualmente chamado de ferrita, possui baixo calor de hidratação e reage rápido, tem como propriedade principal, imprimir resistência à corrosão química ao cimento, e confere ao mesmo uma cor acinzentada (SOUZA, 2009).

#### 2.3.2.5 Componentes secundários do clínquer Portland

Além dos compostos principais presentes no clínquer, existem ainda compostos secundários em pequenas proporções como  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{MnO}_2$ . SANTOS JUNIOR (2006) menciona sobre alguma contribuição destes óxidos secundários na taxa de crescimento da resistência a compressão do cimento.

Em sua grande maioria, os componentes secundários presentes no cimento Portland têm sua origem, nos materiais provenientes de coprocessamento nos fornos, nas matérias-primas, nos combustíveis, no revestimento refratário, ou são adicionados à farinha (ou cru).

Essas adições podem influenciar diretamente as reações de formação do clínquer e/ou suas propriedades, de modo geral, tais adições são benéficas e podem acelerar as reações de clínquerização ou mesmo atuar como fundente, baixando a temperatura na qual elas ocorrem, ou ainda aumentar a reatividade do produto final, com desenvolvimento mais rápido dos cristais.

De um modo geral, alguns componentes exercem efeitos benéficos em baixas concentrações, mas podem ser danosos em concentrações mais elevadas (TAYLOR, 1997).

Além desses componentes secundários presentes na farinha ( $MgO$ ,  $K_2O$ ,  $SO_3$ ,  $Na_2O$ ,  $TiO_2$ ,  $Mn_2O_3$ ,  $P_2O_5$ ,  $SrO$ ,  $F^{-1}$ ,  $Cl^{-1}$  e  $Cr_2O_3$ .), existe a presença de  $CaO$  livre, proveniente do processo de calcinação dos carbonatos cálcicos (CHOTOLI, 2006), este trabalho dará enfoque apenas ao  $CaO$  livre e ao periclásio devido possível influência no estado seco do cimento/concreto.

#### **2.3.2.5.1 Óxido de Cálcio (CaO) livre**

Durante a produção de clínquer, a cal livre ( $CaO$ ) se forma através da calcinação do carbonato cálcico, e é considerada indesejável devido sua hidratação tardia, segundo NEVILLE(2015) a hidratação tardia (esquemáticamente representado na equação 2) de alguns compostos presentes no cimento endurecido, especialmente o óxido de cálcio livre, o óxido de magnésio ou periclásio e o sulfato de cálcio geram expansão significativa que pode causar desagregação da pasta de cimento endurecida. Em seu trabalho GOBBO (2003) considera cal livre indesejável no clínquer Portland a partir de 2%, descreve ainda que os clínqueres em sua grande maioria, apresentam em média 1% de cal livre, sendo sua presença usada como parâmetro para o controle das condições de fabricação.

O processo e as condições de queima vão depender do teor de  $CaO$  não combinado, denominado como  $CaO$  livre. Assim, a monitoração do  $CaO$  livre no clínquer de laboratório ou fábrica, bem como no cimento acabado, representa uma das medidas fundamentais do controle de qualidade e de avaliação do processo.

O  $CaO$  livre ocorre numa pequena quantidade (cerca de 1%), na forma de grãos arredondados agrupados ou não (grãos simples) apresentando muitas vezes diâmetro equivalente ao do  $C_2S$ .

A presença de CaO livre no clínquer está associada ao C3S e à fase líquida e pode significar queima insuficiente, falta de homogeneização das matérias-primas, moagem inadequada e elevado fator de saturação da farinha.

Hidratação de Cal livre:  $\text{CaO}_{\text{livre}} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 \quad \Delta V \geq 100 \% \quad \text{----- Equação 2}$

### 2.3.2.5.2 Óxido de magnésio (MgO) ou Periclásio

Uma das formas de ocorrência do periclásio é na presença do calcário dolomítico na farinha ou provenientes de refratários cromomagnesianos encontrados na parede dos fornos. O periclásio tem sua formação no clínquer a partir de calcários magnesianos, geralmente quando os teores de MgO ultrapassam 2%, cristalizando-se no sistema cristalino cúbico (MARINGOLO,2001).

BARBOSA (2009) exemplifica esquematicamente na equação 3, o início da decomposição do carbonato de magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ), cujo óxido de magnésio gerado nesta reação não se combina com os demais óxidos.

$\text{MgCO}_{3(\text{s})} \rightarrow \text{MgO}_{(\text{s})} + \text{CO}_{2(\text{g})} \quad \text{----- Equação 3}$

Semelhante ao CaO livre que reage com água, o óxido de magnésio pode contribuir para expansão do cimento, no entanto, somente o periclásio, MgO cristalino, tem reação deletéria, e o MgO presente na fase vítrea é inofensivo.

O teor de MgO é geralmente limitado, porque quantidades em excesso deste componente, podem ocorrer como periclásio (óxido de magnésio), que através de reação tardia com água (representado na equação 4) pode causar a expansão destrutiva de concreto endurecido (TAYLOR, 1997).

Hidratação de MgO livre:  $\text{MgO}_{\text{livre}} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2 \quad \Delta V \geq 100 \% \quad \text{----- Equação 4}$

Em seu trabalho CENTURIONE (1993), evidencia que a temperaturas elevadas de queima, altas concentrações de MgO participa na formação da fase líquida, entrando em solução nas diferentes fases do clínquer, principalmente na Alita, substituindo o óxido de cálcio.

A expansão mencionada pela grande maioria dos autores, é avaliada pelo comportamento do cimento no teste em autoclave, onde as reações hidratação do periclásio presente no cimento é acelerada e se completa sob condições de vapor superaquecido à pressão de  $21 \pm 1 \text{ kg/cm}^2$ . Nos cimentos estáveis, a expansão, após o tratamento de autoclave, não deve exceder 0,8% (RESHI, 1983 apud CHOTOLI; 2006)

MEHTA e MONTEIRO(2008), afirmam que o óxido de magnésio (MgO) cristalino, presente no clínquer de cimento Portland, que foi exposto a temperaturas entre 1400 a 1500°C, é essencialmente inerte à humidade à temperatura ambiente, porque a reatividade do periclásio cai bruscamente quando é aquecido acima de 900°C.

## 2.4 Hidratação do Cimento Portland

As reações de hidratação pelas quais o cimento se torna um material aglomerante ocorrem na pasta, em outras palavras, a presença de água e dos materiais listados na tabela 9, formam produtos hidratados que, com o passar do tempo resulta em uma massa rígida, ou a pasta hidratada.

Em seus estudos NEVILLE (2015) propõe que existem duas maneiras de hidratação do cimento Portland. A primeira acontece adição direta de algumas moléculas de água, sendo esta a verdadeira reação de hidratação. A segunda se dá por meio de hidrólise, no entanto, é conveniente aplicar o termo hidratação a todas as reações de cimento com água.

Segundo Mehta & Monteiro (2008), os sólidos na pasta de cimento hidratado são os seguintes:

- Silicato de cálcio hidratado (C-S-H): A fase C-S-H, constitui 50 a 60% do volume de sólidos numa pasta de cimento Portland completamente hidratada e é, portanto, a fase mais importante que determina as propriedades da pasta.
- Hidróxido de cálcio (C-H): Cristais de hidróxido de cálcio (também chamado de portlandita), constituem 20 a 25% do volume de sólidos na pasta completamente hidratada. Comparado com C-S-H, seu potencial de contribuição com resistência da pasta é limitado, resultado de uma área de superfície consideravelmente inferior.
- Sulfoaluminatos de cálcio hidratados: Sulfoaluminatos de cálcio(também chamados de etringita), constituem de 15 a 20% do volume de sólidos na pasta

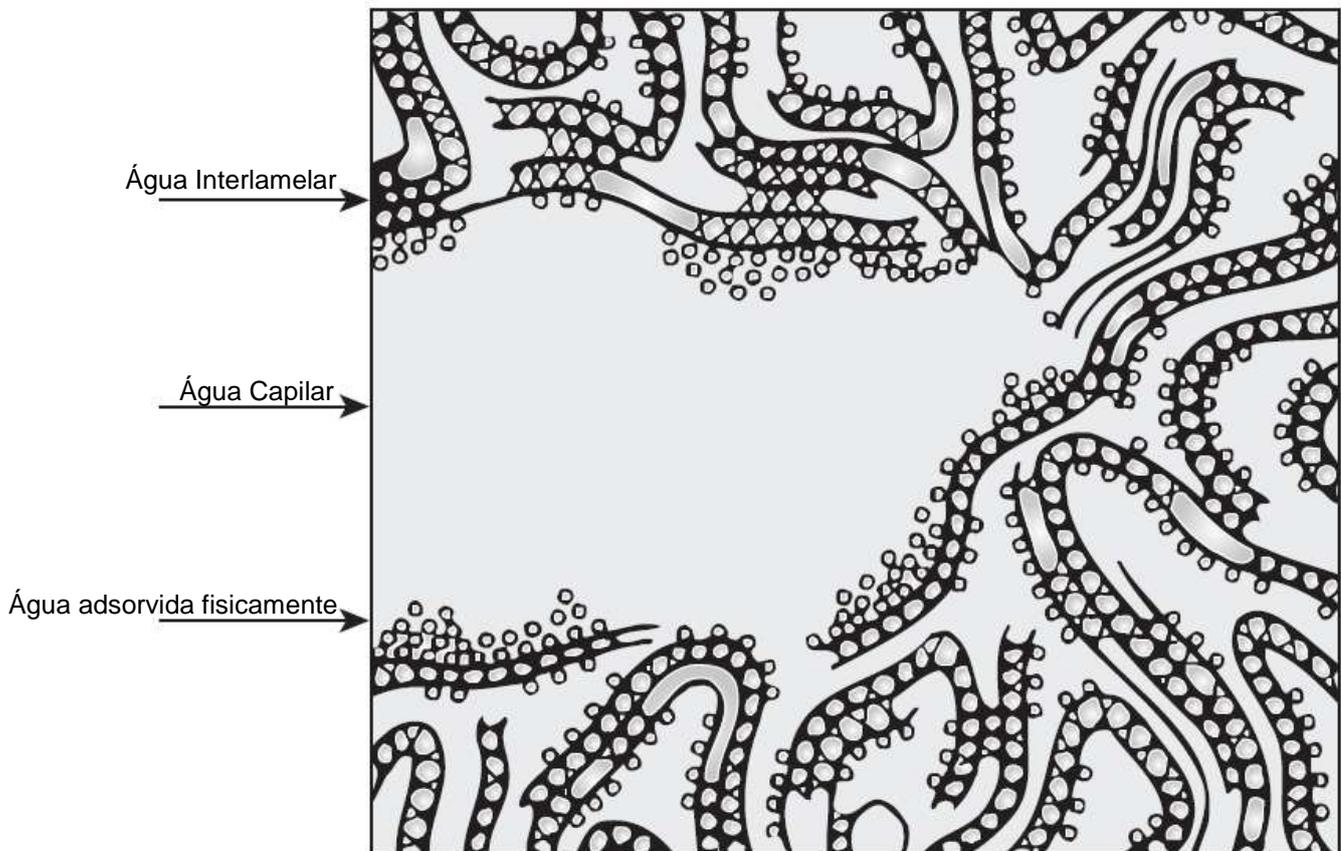
hidratada, e portanto, desempenham apenas uma função secundária. A presença da etringita no concreto de cimento Portland torna o concreto vulnerável ao ataque de sulfato.

- Grãos de clínquer não hidratados: Dependendo da distribuição granulométrica das partículas de cimento e do grau de hidratação, alguns grãos de clínquer não hidratados podem ser encontrados na microestrutura de pastas de cimento hidratadas, mesmo muito tempo após a sua hidratação.

Devido ao limitado espaço disponível entre as partículas, os produtos de hidratação tendem a cristalizar em grande proximidade com as partículas de clínquer hidratadas, o que dá a aparência de uma formação de revestimento ao seu redor. Em idades posteriores, devido à falta de espaço disponível, a hidratação in situ de partículas de clínquer resulta na formação de um produto de hidratação muito denso, cuja morfologia pode assemelhar-se à partícula de clínquer original.

Além dos sólidos, a pasta de cimento hidratado contém vários tipos de vazios que têm uma influência importante nas suas propriedades, espaço interlamelar no C-S-H, vazios capilares, ar incorporado, água retida na pasta de cimento hidratado, além do vapor em espaços vazios ou parcialmente cheios de água, existe água na pasta de cimento hidratado nos seguintes estados: Água capilar, Água adsorvida, Água interlamelar ou entre camadas, Água quimicamente combinada.

Com base no modelo de Feldman-Sereda citado por Mehta & Monteiro (2008), diferentes tipos de água associados com o C-S-H são ilustrados na Figura 9.



**Figura 9: Modelo esquemático dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratados. [Baseado em Feldman, R.F., e P.J. Sereda, Eng. J. (Canada), Vol. 53, No. 8/9, 1970.] citado por MEHTA & MONTEIRO(2008).**

## **2.5 Calorimetria de Condução**

Uma das formas mais simples e diretas de se avaliar a cinética das reações de hidratação do cimento Portland, é através da taxa de energia liberada. Esta medida fornece informações sobre as reações químicas que ocorrem durante a hidratação do cimento Portland, incluindo o efeito de adições e aditivos, entre outros (SILVA, 2001 *apud* BETIOLI 2007).

Para avaliar a cinética de hidratação, diversos autores fizeram experimentos em pastas de cimento Portland finamente moídas, fazendo uso de técnicas de calorimetria diferencial de varredura, dados da literatura para a investigação experimental do calor liberado em experimento de DSC sugerem que durante a hidratação do cimento Portland, monitorada por calorimetria isotérmica, ocorrem em seis etapas, que poderão ser observadas na Figura 10.

Pico de calor inicial ou pré-indução (A): Associado à combinação exotérmica da dissolução de sulfatos e hidratação inicial de fases anidras do cimento;

Período de indução ou dormência (B): Associado à pouca liberação de calor em fase de hidratação controlada e lenta devido a formação de uma camada de gel, que forma uma barreira entre as fases anidras e a solução aquosa.

Período de aceleração (BD): Onde ocorre hidratação dos silicatos, predominância da alita ( $C_3S$ ) até atingir taxa máxima de hidratação, que corresponde ao máximo de calor liberado (D).

Pico principal de hidratação (C): Associado principalmente com as reações de hidratação da alita ( $C_3S$ ) que contribuem para pega e desenvolvimento de resistências iniciais;

Período de desaceleração (E): Tem seu início evidenciado com a diminuição da taxa de calor devido a extinção de sulfatos solúveis, seguido pela reação acelerada do aluminato de cálcio.

Estágio final (F): Nesta fase pode ocorrer um pequeno pico, devido provavelmente a precipitação da etringita.

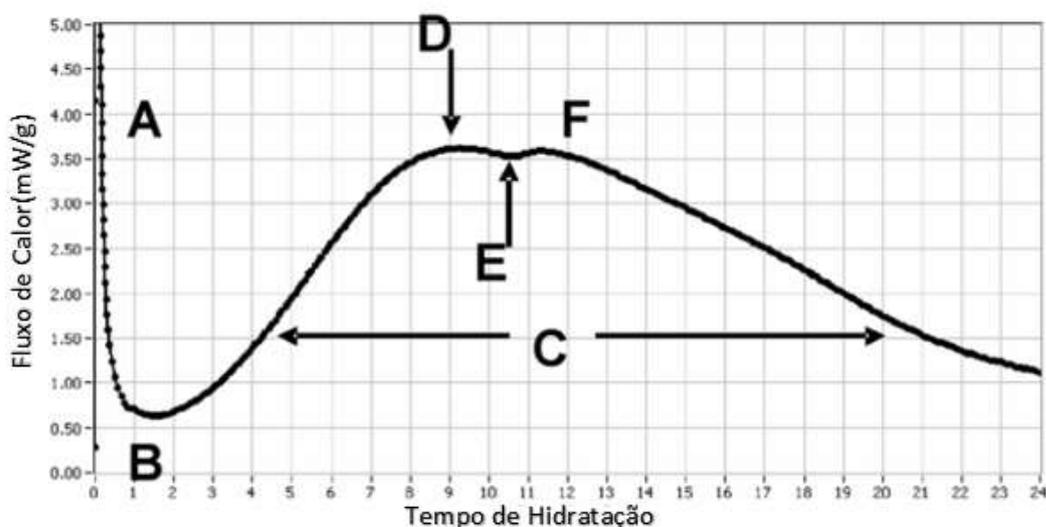


Figura 10: Curva típica de evolução de calor de hidratação de Cimento Portland (Fonte: adaptado de ASTM C1679-092).

De maneira análoga, QUARCIONI (2008) em seus estudos sobre a cal hidratada, pode mostrar os mesmos intervalos, como exemplificado na figura 11.

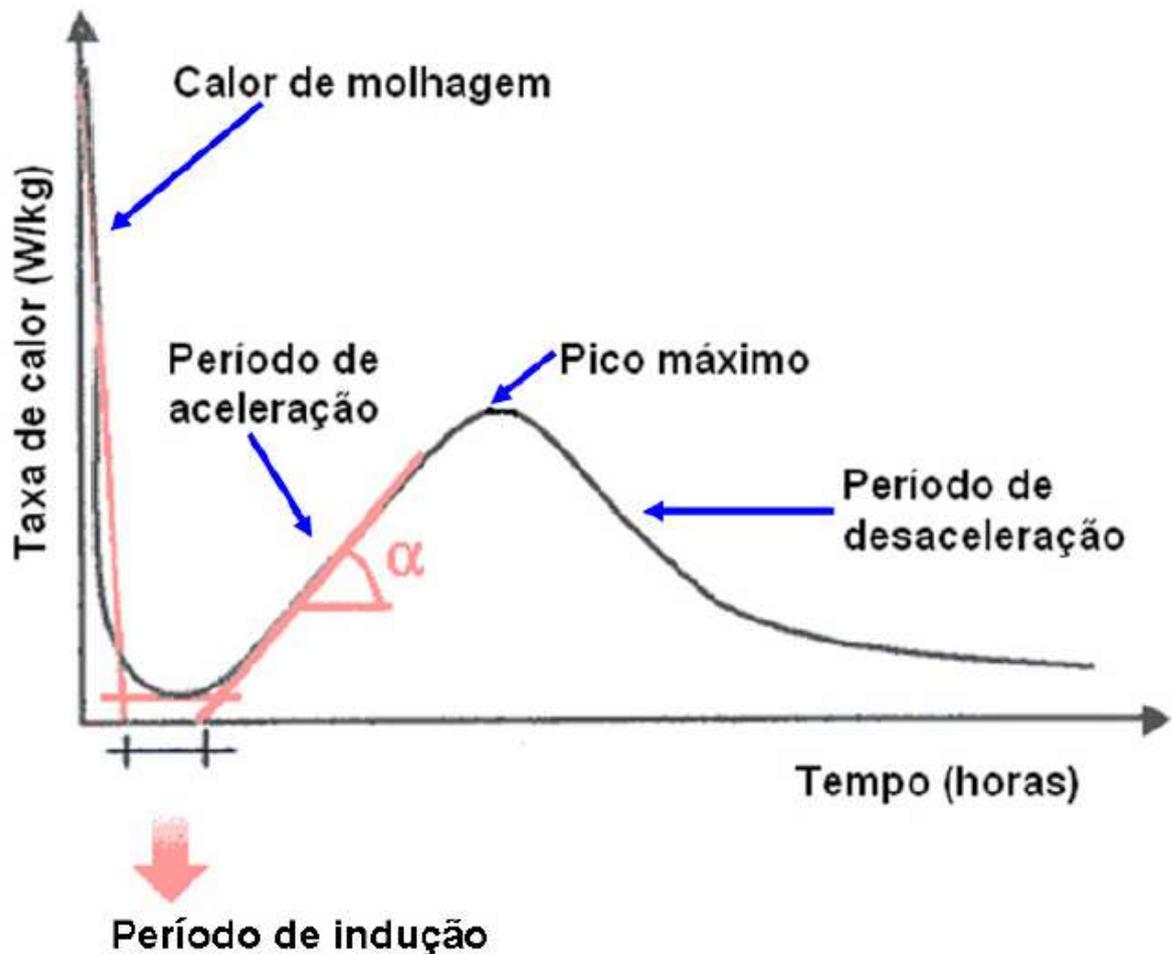


Figura 11: Representação esquemática da curva de calor de hidratação e critérios para determinação das variáveis [adaptação de Betiole (2007)] citado por QUARCIONI (2008)

## 2.6 Aditivos

A NBR 11768 (1992) define os aditivos como “produtos que, adicionados em pequena quantidade a concretos e argamassas de cimento Portland, modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições”.

Duarte (2013) definiu aditivo como substâncias químicas que são adicionadas na composição do concreto para fins específicos, que podem melhorar sua trabalhabilidade, acelerar ou retardar seu processo de cura. O mesmo autor relata que o uso de aditivos no Brasil de forma intensiva teve seu início somente a partir de 1990.

NEVILLE (2015) propõe que um aditivo pode ser definido como um produto químico que, exceto em casos especiais, é adicionado ao concreto em quantidades máximas de até 5%, em relação à massa de cimento, durante a mistura ou durante uma mistura complementar antes do lançamento do concreto, com o objetivo de obter uma alteração específica, ou alterações, nas propriedades normais do concreto.

Os aditivos podem ter composição orgânica ou inorgânica, mas seu atributo químico, diferenciado de mineral, é sua principal característica. Na nomenclatura americana, eles são denominados aditivos químicos.

Os aditivos normalmente são classificados conforme sua função no concreto, mas, frequentemente, eles possuem ações adicionais. A classificação da ASTM C494-10 é a seguinte: Tipo A (Redutor de Água), Tipo B (Retardador), Tipo C (Acelerador), Tipo D (Redutor de Água e Retardador), Tipo E (Redutor de Água e Acelerador), Tipo F (Redutor de Água de elevado desempenho ou superplastificante), Tipo G (Redutor de Água de elevado desempenho e retardador ou superplastificante e retardador) e Tipo S (Desempenho específico).

Mehta & Monteiro (2008), acreditavam que os aditivos podiam variar amplamente na composição química, e muitos executam mais de uma função, portanto, é difícil classificá-los de acordo com suas funções.

Aditivos Plastificantes (tipo P): produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento;

Como seu próprio nome indica, a principal função destes aditivos é reduzir o teor de água da mistura, geralmente, de 5 a 10%, em alguns casos, chegando algumas vezes, até 15%. Dessa forma, os objetivos do uso de um aditivo redutor de água no concreto incluem possibilitar uma redução da relação água/cimento(A/C), enquanto a trabalhabilidade requerida é mantida, ou aumentar a trabalhabilidade para uma determinada relação A/C. Considerando que agregados de má granulometria, evidentemente não deveriam ser utilizados, os aditivos redutores de água melhoram as propriedades do concreto fresco produzido com esses agregados, ou seja, com uma mistura áspera. O concreto que contém um aditivo redutor de água, em geral, apresenta baixa segregação e boa fluidez

**Tabela 11: Principais características do aditivo utilizado;**

Descrição do Produto	Cor	Dosagem Recomendada	Massa Específica g/cm <sup>3</sup> (NBR 10908)
Manutenção de abatimento com incremento de resistência.	Marrom	*Até 1,0%	1,13 - 1,19
Elevada redução de água e aumento do início de pega.	Marrom	*Até 1,0%	1,14 - 1,20

\*Dosagem percentual referente a massa de cimento

Tabela 12: Características dos aditivos (ABCP; 2007 Apud MARTINS; 2008).

Tipos	Efeitos	Vantagens	Desvantagens
Plastificante	Aumenta o índice de consistência possibilita a redução de pelo menos 6% da água de amassamento	Maior trabalhabilidade e menor consumo de cimento para uma determinada resistência e trabalhabilidade	Retarda o início de pega para dosagens elevadas do aditivo, aumentando o risco de segregação
Retardador de pega	Aumenta o tempo de início de pega	Mantém a trabalhabilidade a temperatura elevadas, retarda a elevação do calor de hidratação e amplia os tempos de aplicação	Pode promover exsudação e pode aumentar a retração plástica do concreto
Acelerador de pega	Pega mais rápida e uma resistência inicial mais elevada	Ganho de resistência em baixas temperaturas e redução do tempo de desfôrma	Possível fissuração devido ao calor de hidratação, risco de corrosão de armaduras
Plastificante e retardador	Efeito combinado do plastificante e retardador de pega	Reduz a perda de consistência em climas quentes e úmidos	Aumento da exsudação e retração plástica e do risco de segregação
Plastificante e acelerador	Efeito combinado do plastificante e acelerador de pega	Reduz a quantidade de água e permite ganho mais rápido de resistência	Risco de corrosão de armadura
Incorporador de ar	Incorpora pequenas bolhas de ar no concreto	Aumenta a durabilidade ao congelamento do concreto sem elevar o consumo de cimento e o conseqüente aumento do calor de hidratação; reduz o teor de água e a permeabilidade do concreto	Necessita um controle mais cuidadoso da porcentagem de ar incorporado e do tempo de mistura
Superplastificante	Elevado aumento do índice de consistência, o que possibilita a redução de, no mínimo, 12% da água de amassamento	Eficiente redutor de água, proporcionando ganhos de resistência para determinada trabalhabilidade, e reduz o consumo de cimento	Riscos de segregação da mistura. O efeito do fluidificante é num tempo menor do que o plastificante, podendo elevar a perda de consistência

## **2.7 Concreto**

O concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural de construção civil da atualidade (HELENE e ANDRADE, 2010).

De acordo com norma internacional ASTM C 125, Concreto é um material compósito que consiste essencialmente de um meio de ligação no interior do qual estão incorporadas partículas ou fragmentos de agregado. No concreto hidráulico, o ligante é formado a partir de uma mistura de cimento hidráulico e água.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 12655-2015), define concreto de cimento Portland como um material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos, pigmentos, metacaulim, sílica ativa e outros materiais pozolânicos), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água). Para os efeitos desta Norma, o termo “concreto” se refere sempre a “concreto de cimento Portland”.

O concreto de cimento Portland é um material poroso, com estrutura bastante heterogênea e complexa, constituído de três fases distintas: a pasta, o agregado e a zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

### **2.7.1 Considerações Gerais**

#### **2.7.1.1 Custo**

É recomendável que se faça uma análise prévia dos materiais disponíveis antes da partida de uma central dosadora de concreto, evitando desta forma a falta de materiais tecnicamente aceitáveis e, ao mesmo tempo, o desabastecimento de materiais economicamente viáveis. Em outras palavras, quando um material é ofertado por mais de um player, e suas características técnicas são parecidas, provavelmente o player o que possui menor preço de venda será o fornecedor do material, e a central terá seu balanço financeiro saudável.

### 2.7.1.2 Trabalhabilidade

É a propriedade do concreto fresco com efeito direto na sua aptidão para ser lançado com determinada facilidade sem a perda de sua homogeneidade e sem segregação. Caracteriza-se pela medida da consistência do concreto. Dito isso, uma mistura de concreto difícil de lançar e adensar não só aumentará o custo de manuseio, mas também terá uma fraca resistência, durabilidade e aparência devido à falta de adensamento. Da mesma forma, misturas de concreto propensas a segregar são mais caras para terminar e produzirá um concreto menos durável. Deste modo, a trabalhabilidade pode afetar tanto o custo como a qualidade das misturas de concreto. No entanto, na prática é difícil medir a trabalhabilidade conforme a definição e o que se avalia na verdade é a trabalhabilidade resultante do método específico adotado, sendo assim, não existe ensaio para medir diretamente a trabalhabilidade do concreto, algumas tentativas foram feitas para relacionar a trabalhabilidade com grandezas físicas, mas nenhuma satisfatória, embora forneçam informações úteis (NEVILLE; 2015).

Para HELENE e ANDRADE(2010), a trabalhabilidade do concreto é influenciada por fatores intrínsecos ao concreto, como a sua relação água/materiais secos, tipo e consumo de cimento, traço, teor de argamassa, tamanho, textura e forma dos agregados.

MEHTA e MONTEIRO (2008), fizeram algumas considerações que orientam a trabalhabilidade das misturas de concreto, são as seguintes:

- A consistência do concreto não deve ser mais do que necessário para a facilidade de lançamento, adensamento e acabamento. No Brasil, a consistência do concreto fresco é usualmente avaliada pelo abatimento do tronco de cone ou Slump Test, criado por Abrams e descrito pela NBR NM 67 (1998).
- A demanda d'água para uma dada consistência aumenta com a relação areia / agregado graúdo e a quantidade de finos na areia.
- Para misturas de concreto que requerem alta consistência no momento do lançamento, deve-se considerar a utilização de aditivos que reduzem a água e que retardam a aderência, em vez da adição de água extra no local de trabalho.

### 2.7.1.3 Resistência e Durabilidade

Durabilidade do concreto é geralmente controlada pela permeabilidade, nas operações de concreto, na grande maioria das vezes, apenas são especificadas a trabalhabilidade e resistência do concreto. A consideração da durabilidade é ignorada a menos que as exposições ambientais especiais o exijam.

A agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente do tipo de ações externas (NBR 6118), essa agressividade ambiental deve ser classificada e avaliada, simplificada, segundo as condições de exposição listada na tabela 12. A mesma norma na falta de ensaios comprobatórios de desempenho frente ao nível de agressividade, permite adotar os requisitos mínimos expressos nas tabelas 13 e 14.

**Tabela 13: Classes de agressividade ambiental (fonte NBR 6118)**

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>1), 2)</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>1)</sup>	Grande
		Industrial <sup>1), 2)</sup>	
IV	Muito Forte	Industrial <sup>1), 3)</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

1) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

2) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

3) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

**Tabela 14: Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto (fonte NBR 6118)**

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 13)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

**NOTAS**

- 1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.  
 2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.  
 3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido

**Tabela 15: Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal (fonte NBR 6118)**

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 13)			
		I	II	III	IV <sup>3)</sup>
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje <sup>2)</sup>	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido <sup>1)</sup>	Todos	30	35	45	55

- 1) Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.  
 2) Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.  
 3) Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

### 2.7.2 Considerações Sobre Dosagem

Diversos procedimentos para se calcular as proporções adequadas e mais econômicas de misturas de concreto (traço) estão disponíveis, abordagens matemáticas para um certo conjunto de especificações geralmente não funcionam na prática, diante da grande variedade dos materiais e suas características.

Geralmente, as misturas de concreto são especificadas apenas pela consistência no estado fresco e sua referida resistência aos 28 dias, a maioria dos métodos de dosagem disponíveis para concretos cobrem estas exigências.

Helene; Terzian (1993), propuseram que a dosagem deve atender as exigências de projeto, as condições de exposição e operação, os tipos de agregados disponíveis, as técnicas de execução e o custo final do concreto a ser obtido.

### 2.7.2.1 Exigências de Projeto

- Características mínimas de resistência (através da relação  $a/c$ );
- Características geométricas das peças (através do teor de argamassa  $\alpha$ );
- Resistividade elétrica;
- Deformabilidade. (Condicionada pelo volume da pasta);
- Acabamento superficial (vinculado à textura, à trabalhabilidade e ao teor  $\alpha$ );
- Espaçamentos entre as armaduras e entre estas e as fôrmas (que condicionam, basicamente, a dimensão máxima característica da granulometria do agregado);
- Possibilidade de manutenção visando durabilidade.

### 2.7.2.2 Condições de exposição e operação

- Condições regionais: atmosfera rural, urbana, industrial, ou marinha.
- Condições locais:
  - Localização da peça estrutural: interna ou externa.
  - Tipo de proteção: peças revestidas e peças não revestidas.
  - Tipo de ambiente: agressivo ou não agressivo (agressividade da atmosfera, do solo, ou de eventuais produtos em contato com a estrutura).
  - Tipo de solicitação e de operação dos elementos estruturais (pressão e velocidade da água, abrasão, insolação e resfriamento brusco, ocorrência de condensação, nível de tensões).

No Brasil existem diversos métodos de dosagem de concreto, Rodrigues (1998; Apud Assunção; 2002) relaciona os 4 métodos de dosagem de concreto mais empregados no país.

1 - Método do ITERS, atualmente identificado como CIENTEC;

2 - Método do INT;

3 - Método do IPT;

4 - Método ABCP;

Em seus trabalhos, HELENE e TERZIAN(1993) ressaltam Hernani Sávio Sobral (1977) sobre a generalização das técnicas de dosagem, enquanto, Assunção(2002) referência Hernani Sávio Sobral (1980) sobre os quatros métodos mais usados no Brasil, evidenciando suas características comuns, são elas:

- Os critérios para a fixação do valor da resistência de dosagem;
- A determinação da relação água/cimento (a/c) em função da resistência de dosagem;
- A determinação da relação água/cimento (a/c) em função da durabilidade do concreto.

MEHTA e MONTEIRO (2008), pontuam uma sequência de nove etapas, para obtenção de um traço de concreto otimizado de acordo com o método proposto pela ACI.

Etapa 1: Escolha do abatimento – Caso não seja especificado o abatimento, um valor apropriado para o trabalho pode ser selecionado da Tabela 15.

Etapa 2: Escolha do tamanho máximo do agregado. A caracterização do agregado resultará em menos vazios, reduzindo assim a necessidade de argamassa na mistura de concreto.

**Tabela 16: Abatimento recomendado para vários tipos de construção.**

Tipos de Construção	Abatimento (mm)	
	Máximo	Mínimo
Paredes de fundações armadas e sapatas	75	25
Sapatas não armadas, caixões e paredes de vedação	75	25
Vigas e paredes armadas	100	25
Pilares de edifício	100	25
Pavimentos e lajes	75	25
Concreto massa	50	25

FONTE: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008).

Passo 3: Estimativa do consumo de água de amassamento e teor de Ar Incorporado. A quantidade de água necessária para produzir um dado abatimento, dependente principalmente da partícula máxima do agregado e se o concreto tem ou não ar aprisionado.

Passo 4: Seleção do teor Água/Cimento(A/C).

Como diferentes tipos agregados e cimento podem produzir uma resistência diferente num mesmo teor A/C, é desejável desenvolver uma família de traços para os materiais a serem utilizados, relacionando a resistência e o teor A/C pela Lei de Abrams, exemplificada na Figura 12.

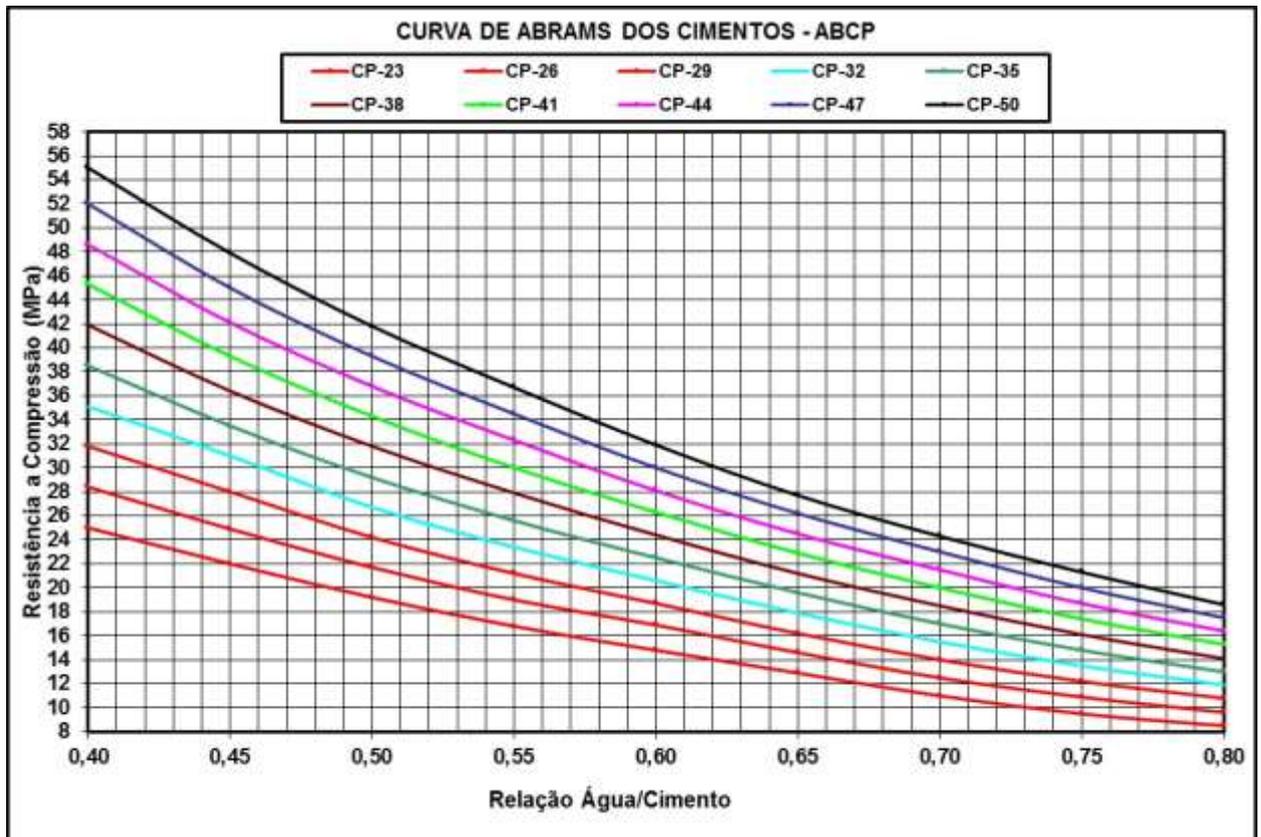


Figura 12: Gráfico para a determinação da relação A/C em função das resistências do concreto aos 28 dias.

Fonte: site da Universidade UNOCHAPECÓ ( <https://www.unochapeco.edu.br/civil/downloads/tra-o-m-todo-int/down> )

Passo 5: Estimativa do consumo de cimento.

O teor de cimento pode ser calculado dividindo o teor de água de mistura do Passo 3 pela relação água-cimento.

6: Estimativa do teor de agregado graúdo.

Dados da literatura sugerem que a utilização de materiais adequadamente classificados, quanto mais fina a areia e maior o tamanho da partícula grossa, maior será o volume do agregado graúdo que pode ser usado para produzir um concreto de trabalhabilidade satisfatória.

Passo 7: Estimativa do teor de agregados miúdos.

Após o Passo 6, todos os materiais do concreto foram estimados exceto o agregado miúdo, no caso do método em volume absoluto, o volume total deslocado pelos materiais conhecidos é subtraído do volume unitário do concreto para se obter o volume necessário de agregado miúdo.

Passo 8: Ajustes da humidade do agregado.

Geralmente, os agregados de estoque são húmidos e precisam de correção da umidade antes de serem dosados, evitando desbalanceamento mássico da mistura.

Passo 9: Ajustes no lote experimental.

Devido as estimativas nos cálculos teóricos, as proporções de misturas reais a serem utilizadas, devem ser verificadas e ajustadas por meio de ensaios de laboratório em pequenos lotes.

### 2.7.2.3 Cálculo da resistência de dosagem

Segundo a NBR 12655/2015, a resistência de dosagem  $f_{cmj}$  deve atender às condições de variabilidade medida pelo desvio-padrão ( $S_d$ ), expressa em Megapascal, de acordo com a equação 5:

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65x S_d \text{ ----- Equação 5}$$

$f_{cmj}$ : É a resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de  $j$  dias, expressa em megapascals (MPa)

$f_{ckj}$ : É a resistência característica do concreto à compressão, aos  $j$  dias, expressa em megapascals (MPa)

$S_d$ : É o desvio-padrão da dosagem, expresso em megapascals (MPa)

Diante das condições de preparo do concreto de cada usina, a norma NBR 12655/2015, estabelece que serão adotados os valores previstos na Tabela 17, quando o desvio-padrão não for conhecido, tais condições serão definidas a seguir:

**Tabela 17: Desvio-padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto**

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

Fonte: NBR 12655/2015

Condição A: o cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados;

Condição B (pode ser aplicada às classes C10 a C20): o cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume;

Condição C (pode ser aplicada apenas aos concretos de classe C10 e C15): o cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e a sua quantidade é corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados da determinação da consistência do concreto, conforme disposto na NM 67 ou outro método normalizado

### **2.7.3 Propriedades do Concreto no Estado Fresco**

Estado fresco do concreto é o período em que o concreto apresenta consistência plástica. As duas principais razões de se controlar as propriedades do concreto neste estado são: Obter uma mistura que seja facilmente lançada e a outra é que, quando as propriedades no estado fresco estão sob controle, provavelmente no estado endurecido se terá um material com as propriedades também de acordo com o desejado. (AITCIN; 2000 Apud Lodi; 2006).

Embora o concreto fresco apresente apenas uma fase transitória, ressalta-se que a resistência do concreto é diretamente e seriamente influenciada pelo grau de adensamento, propriedade que encontramos no concreto em seu estado fresco. É, portanto de extrema importância que o concreto tenha aderência necessária para ser

transportado, adensado e acabado com facilidade e sem segregação (NEVILLE, 1997).

Para HELENE e ANDRADE (2007), a trabalhabilidade do concreto é influenciada por fatores intrínsecos ao concreto, como sua relação água/materiais secos, tipo e consumo de cimento, proporção dos materiais, teor de argamassa, textura e formas dos grãos além dos fatores externos como condições de transporte, lançamento, características das fôrmas, esbelteza dos elementos estruturais, densidade e distribuição das armaduras, entre outros.

### **2.7.3.1 Segregação**

Segregação é definida como a separação dos componentes de uma mistura de concreto fresco de modo que eles não são mais uniformemente distribuídos (MEHTA e MONTEIRO, 2008). É de grande interesse reduzir a tendência de segregação numa mistura de concreto, visto que, o adensamento total, é essencial para atingir o potencial máximo de resistência, este potencial não é possível numa mistura de concreto segregado.

Segregação excessiva pode ocorrer em concretos pouco coesos devido à facilidade de deslocamento dos agregados em relação à pasta fresca. A adição de finos aumenta a coesão do concreto, portanto o aumento do teor de cimento ou o uso de adições tornam o concreto menos sujeito à segregação. O ar incorporado atua como um material fino, diminuindo a segregação (BUEST NETO, 2006).

### **2.7.3.2 Exsudação**

Para Neville(2015), a exsudação é uma forma de segregação na qual parte da água da mistura tende a migrar para a superfície do concreto recém-lançado.

MEHTA e MONTEIRO (2008), definem exsudação como um fenômeno cuja manifestação externa é o aparecimento de água na superfície depois de uma mistura de concreto ter sido lançada e compactada. A água é o componente mais leve em uma mistura de concreto; Assim, a exsudação é uma forma de segregação porque os sólidos em suspensão tendem a se mover para baixo sob a força da gravidade.

Dentre as consequências da exsudação e, principalmente, da taxa de ocorrência desse fenômeno no concreto, tem-se a retração plástica, as fissuras de assentamento plástico quando lançado, maior porosidade do concreto ocasionando problemas de

durabilidade, dificuldades de acabamento e, durante o transporte, o entupimento da mangueira quando o concreto é bombeado (RODOLPHO, 2007).

Segundo PETRUCCI (1975 Apud Silva; 2005), a exsudação pode ser controlada com o uso de misturas ricas, contendo cimentos muito finos e agregados naturais de grãos arredondados, podendo também ser utilizadas adições de grãos bem finos, compensando as deficiências dos agregados.

### **2.7.3.3 Consistência**

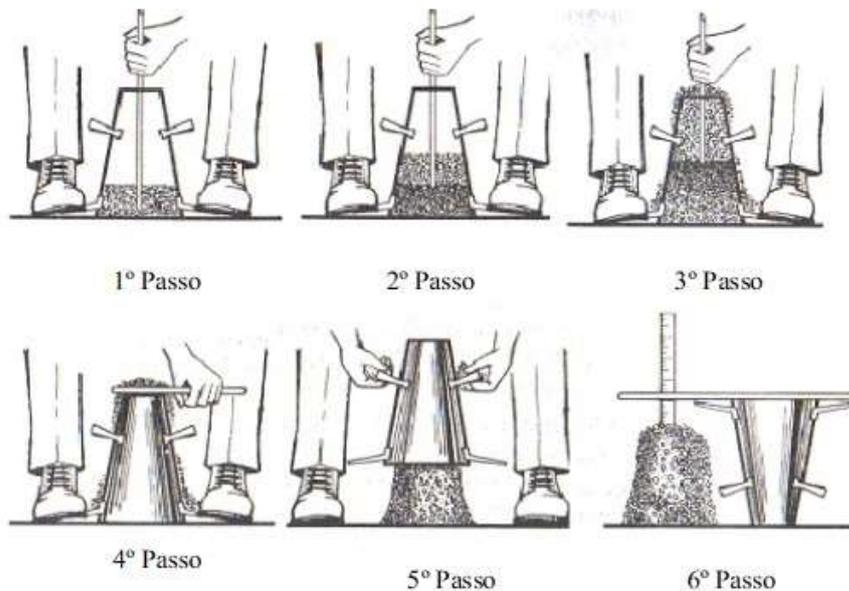
PETRUCCI (1998) considera como propriedades do concreto fresco a consistência, a textura, a trabalhabilidade, e integridade da massa, o poder de retenção de água e a massa específica, e para o autor, o ensaio de abatimento do tronco do cone expressa a medida da trabalhabilidade do concreto.

Outros autores relacionaram a trabalhabilidade com a consistência, para GIAMMUSSO (1992), a consistência era um dos principais fatores que influencia a trabalhabilidade e este fator depende principalmente da quantidade de água da mistura, sendo influenciado diretamente com aumento da quantidade de água, tornando a mistura fresca mais “mole”, mais plástica e mais trabalhável, sendo assim, pode-se descrever a consistência como uma propriedade que representa o grau de umidade do concreto, intimamente relacionado com o grau de plasticidade da massa. Segundo Prudêncio Jr. (2005 Apud Lodi; 2006), a consistência é função da quantidade de água adicionada ao concreto, ou da presença de alguns aditivos. A coesão é a propriedade que reflete a capacidade do concreto de manter sua homogeneidade durante o processo de adensamento, sendo função da quantidade de finos presente na mistura, da presença de alguns aditivos, bem como da granulometria dos agregados graúdo e miúdo e da proporção entre eles.

Apesar da praticidade do método, rapidez e fácil uso, seja em um canteiro ou num laboratório, este método segundo Neville (1997) apresenta algumas restrições para concretos secos ou pobres.

A consistência pode ser medida por diversos métodos, mas devido a praticidade e rapidez, o método mais utilizado até hoje é o Slump Test (ou cone de Abrams). Basicamente o ensaio consiste em preencher um tronco de cone com o concreto e verificar o abatimento causado no concreto pelo deslocamento do seu próprio peso, exemplificado em seis passos pela Figura 13.

No Brasil, a consistência do concreto fresco é usualmente avaliada pelo abatimento do tronco de cone (Slump Test) criado por Abrams e descrito pela NBR NM 67 (1998) da ABNT.



**Figura 13: Procedimento de ensaio de abatimento do tronco de cone (MEHTA; MONTEIRO,1994)**

A aparelhagem utilizada para realização do ensaio (figura 14) é muito simples e consiste de um tronco de cone com medidas de 30 cm de altura, 10 cm de diâmetro de topo e 20 cm de diâmetro de base, uma haste metálica com extremidade semiesférica de 1,6cm de diâmetro para adensamento, uma régua metálica de 30 cm e uma Placa metálica para formar a base com medidas de 500 x 500 x 3 mm. Dentro da forma é colocada a massa de concreto em 3 camadas iguais, adensadas com auxílio da haste, com 25 golpes por camada.



**Figura 14: Conjunto de Slump Test (fonte: própria)**

Na sequência, retira-se lentamente o molde, levantando-o verticalmente em uma razão constante, e determina-se a diferença entre a altura do molde e a massa de concreto.

Para aumentar a confiabilidade do ensaio e minimizar a influência do atrito superficial das paredes do molde sobre o abatimento, o interior do molde e a placa metálica da base devem ser umedecidos no começo de cada ensaio. A figura 15 evidencia algumas formas características de abatimento do concreto fresco em função do tipo de mistura.

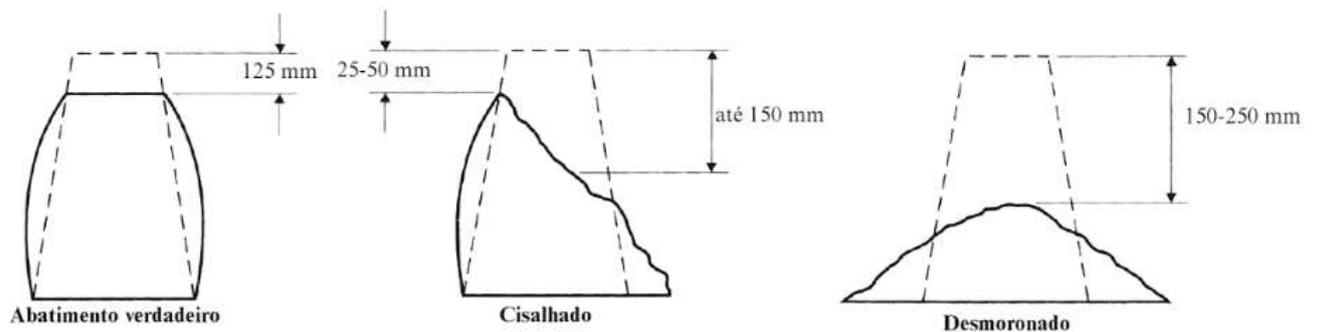


Figura 15: Formas de abatimento do concreto fresco (Neville, 2015).

#### 2.7.3.4 Coesão

Diversos autores consideram a coesão como uma das principais propriedades da mistura de concreto, contribuindo na união da mistura, evitando os fenômenos de segregação e exsudação da massa, de modo que a distribuição da mistura seja uniforme. Especificamente no concreto, a descontinuidade no tamanho das partículas e a massa específica dos agregados utilizados, constituem a causa primária de segregação, mas esta pode ser controlada por um estudo adequado da granulometria dos agregados (NEVILLE, 1997).

Segundo GIAMUSSO (1992; Apud SILVA; 2015), na prática, avalia-se coesão das misturas através de seu aspecto, de acordo com as seguintes características:

- Os agregados não tendem a se mostrar limpos ou lavados;
- As bordas da mistura se mostram convexas;
- As bordas da mistura se mostram convexas;

Diversos autores correlacionam a coesão no concreto com uma certa deficiência de finos, segundo BOMBLED (1967; Apud BUEST NETO; 2006), a coesão pode ser alterada variando-se:

- A área específica dos sólidos;

- A quantidade de água presente na mistura.

Ainda segundo (BUEST NETO; 2006), Na verificação da coesão de um concreto, deve-se analisar o argamassamento no sentido de um bom travamento da mistura (FIGURA 16).

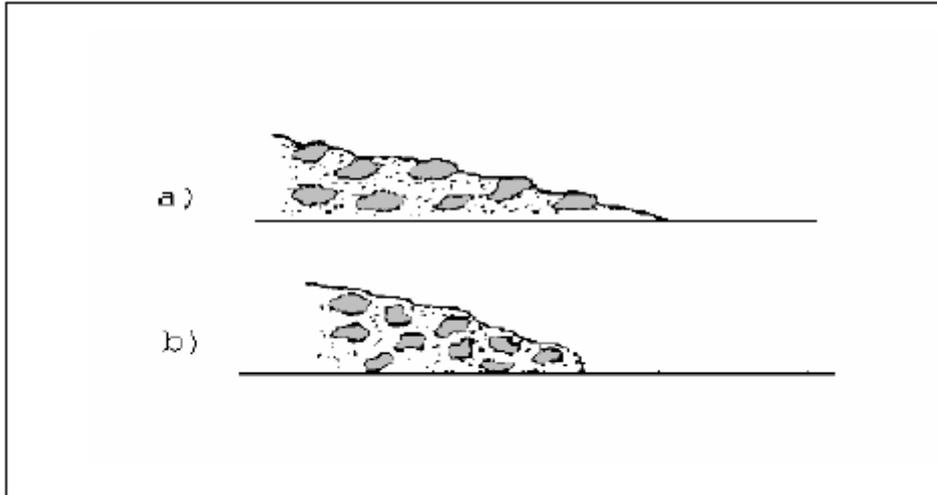


Figura 16: a) Concreto com tendência a segregação, b) Concreto coeso.

Fonte: CAMPITELI( 2004) adaptado de GIAMMUSSO, (1992) citado por BUEST NETO(2006).

### 2.7.3.5 Massa Específica do Concreto Fresco

É usual a determinação da massa específica do concreto fresco para avaliar a trabalhabilidade e o teor de ar aprisionado, Em seu trabalho Prudêncio Jr (2005 Apud Lodi;2006) evidenciam esta necessidade, correlacionando o parâmetro a possíveis reduções significativas na resistência do concreto.

A massa específica do concreto fresco, expressa em  $\text{kg}/\text{dm}^3$ , pode ser determinada através de um ensaio bastante simples descrito pela norma técnica NBR 9833, bastando encher um recipiente de massa e volume conhecidos com concreto devidamente adensando, em seguida dividir a massa do concreto contido no recipiente pelo seu volume.

## **2.7.4 Propriedades do Concreto no Estado Rígido**

Para SILVA (2015), O concreto como um material enrijecido é considerado a partir do momento que se dá o fim da pega, neste estado são analisadas as seguintes propriedades: massa específica, resistência à compressão, resistência à tração, permeabilidade e absorção, retração, fluência e durabilidade. O escopo do presente trabalho não justifica uma abordagem detalhada de todas as propriedades do concreto, este trabalho pretende desenvolver apenas as propriedades analisadas no decorrer dos experimentos.

### **2.7.4.1 Resistência a Compressão**

NEVILLE (2015), menciona em sua obra que a resistência à compressão do concreto não pode ser muito maior que a resistência dos agregados que o compõem.

A resistência de um material é definida como a capacidade de resistir ao estresse sem falha. Em concreto, portanto, a resistência está relacionada com a tensão necessária para causar falha (ou fratura) e é definida como a tensão máxima que a amostra de concreto pode suportar (MEHTA e MONTEIRO; 2008).

Uma série de fatores estão relacionados a resistência a compressão do concreto, a porosidade dos diferentes componentes estruturais do concreto, as proporções dos materiais que compõem a mistura de concreto, grau de compactação e condições de cura, a relação entre o teor A/C (água/cimento) e a porosidade é indiscutivelmente o fator mais importante porque, independentemente de outros fatores, afeta a porosidade tanto da matriz de argamassa de cimento como da zona de transição interfacial entre a matriz e o agregado graúdo.

Embora a resposta real do concreto ao estresse aplicado seja o resultado de interações complexas entre vários fatores, para um melhor entendimento desses fatores, eles podem ser discutidos separadamente em três categorias:

- (1) características e proporções dos materiais,
- (2) condições de cura,
- (3) parâmetros de teste.

### 2.7.4.1.1 Resistência a Compressão e Fatores que a Afetam

Relação ou Teor Água/ Cimento (A/C).

Duff Abrams descobriu em 1918 que existia uma relação entre o teor água/cimento e a resistência do concreto, essa relação pode ser melhor compreendida pelas curvas típicas ilustradas na Figura 17 (MEHTA e MONTEIRO; 2008).

Ar incorporado.

Em determinados momentos, os vazios de ar são incorporados no sistema, como resultado de um adensamento inadequado ou através de aditivos incorporadores ar, em ambos os casos têm-se o efeito de aumentar a porosidade e diminuir a resistência do sistema.

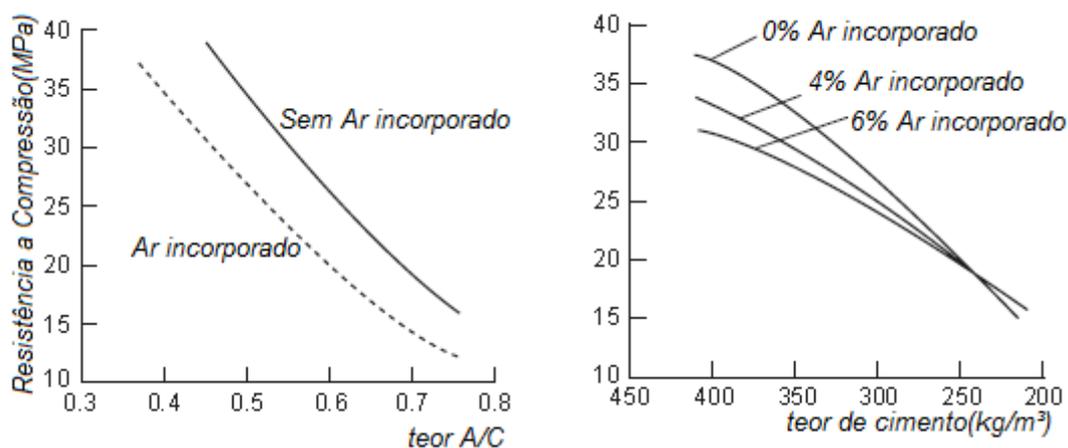


Figura 17: Influência da relação água/cimento, ar incorporado e teor de cimento na resistência do concreto (MEHTA e MONTEIRO; 2008).

Em resumo, a perda de resistência devida a incorporação de ar pode estar relacionada com o nível geral de resistência do concreto, dados na Figura 17 mostram que concretos de alta resistência sofrem uma perda de força considerável com adições de ar incorporado, enquanto que os concretos de baixa resistência tendem a sofrer pequenas perdas de resistências.

Em alguns casos, devido a certa melhora da trabalhabilidade e compactação do concreto, o ar incorporado tende a melhorar a resistência da zona de transição (que para melhor entendimento será representada pela figura 18).

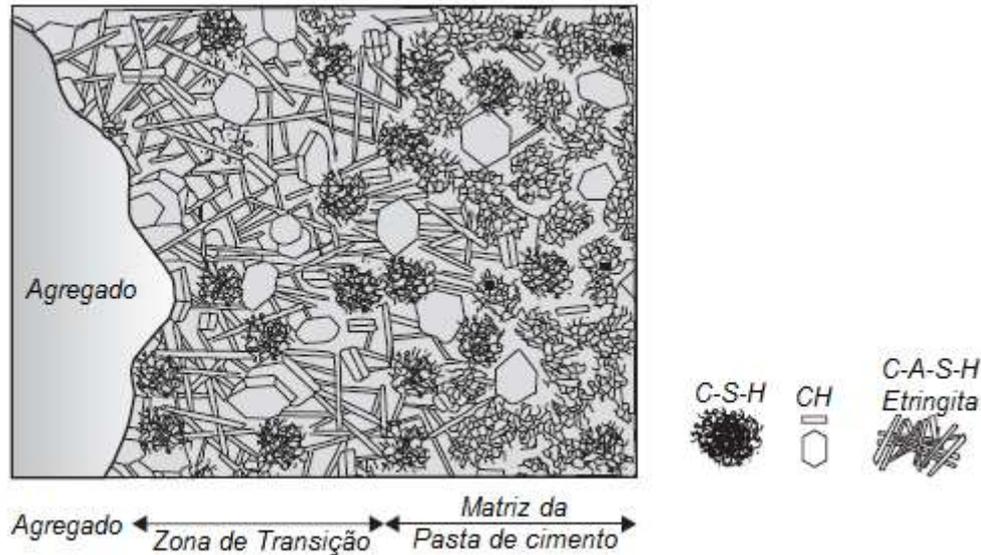


Figura 18: representação da microestrutura do concreto (Adaptada de MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Cimento.

O grau de hidratação do cimento tem um efeito direto na porosidade e conseqüentemente na resistência. Em condições equivalentes de temperatura, cimentos tipo Portland com maior finura e menor adição de minerais(CPV), hidratam mais rapidamente, portanto, em idades iniciais de hidratação e uma dada razão água/cimento, um concreto contendo este cimento, terá uma porosidade inferior e, conseqüentemente, uma resistência maior em baixas idades. Por outro lado, em comparação com os cimentos compostos, cimentos com elevadas adições de escória(CPIII) e cimentos pozolânicos (CPIV), as taxas de hidratação e desenvolvimento de resistências são mais lentas. Contudo, as diferenças geralmente desaparecem depois que atingem certo grau de hidratação em idades avançadas.

Vale ressaltar que, a medida da resistência é função das reações de hidratação dos compostos cimentícios, sendo avaliada em corpos de prova curados por um período de cerca de 28 dias.

Agregados.

No concreto, dificilmente a resistência da mistura é afetada pela resistência agregado, as características do agregado que contribuem para resistência do concreto, estão ligadas ao tamanho, forma, textura da superfície, granulometria e mineralogia.

Alterações na granulometria dos agregados, sem qualquer alteração no tamanho máximo do agregado graúdo, e com a relação água/cimento mantida constante, pode influenciar a resistência do concreto quando as alterações provocarem mudanças na consistência, caracterização e possível exsudação da mistura fresca (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Aditivos & Adições

Devido sua capacidade de reduzir o teor de água no concreto, numa determinada consistência, os aditivos redutores de água, podem aumentar a resistência do concreto.

De forma geral, as adições são utilizadas em grandes quantidades com a finalidade de reduzir custos, bem como melhorar as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido como sua trabalhabilidade, resistência mecânica, à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado e ao ataque por sulfatos (GOMES E BARROS, 2009 Apud SILVA, 2015).

Quando usado como uma substituição parcial para o cimento de Portland, as adições minerais têm geralmente um efeito de retardo na resistência iniciais. No entanto, a capacidade de uma mistura mineral reagir com hidróxido de cálcio e formar silicatos de cálcio hidratado, pode levar a uma redução significativa da porosidade da matriz e da zona de transição interfacial (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Conseqüentemente, podem gerar melhorias consideráveis na resistência em idades avançadas

Adições minerais ao concreto, desde que haja alguma atividade pozolânica, tem forte influência na resistência final, devido à formação de uma maior quantidade de silicato de cálcio hidratado C-S-H, diminuindo a portlandita da matriz e da zona de transição (NEVILLE, 1997), desta forma, contribuindo com a redução da permeabilidade do concreto.

### Cura do Concreto

Cura é a denominação dada aos procedimentos adotados para promover a hidratação do cimento e consiste no controle da temperatura e da entrada e saída de água do concreto. De forma mais específica, o objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou próximo disso, até que os espaços da água sejam preenchidos pela quantidade requerida de produtos de hidratação (NEVILLE, 2015).

### Parâmetros de Ensaio

A aceitação ou reprovação de uma peça ou estrutura de concreto está condicionado ao ensaio de resistência à compressão, que por sua vez está condicionado aos parâmetros estabelecidos pela norma NBR 5739.

Nesta etapa, a moldagem dos corpos de prova é fundamental para o sucesso dos ensaios subsequentes no estado endurecido. A norma NBR 5738 (2015) descreve os procedimentos necessário à moldagem e à cura dos corpos de prova.

A moldagem pode ser realizada com adensamento mecânico ou manual, limitado a sua classe de abatimento, como descrito pela tabela 18, sendo necessário uma haste metálica com extremidade semiesférica de 1,6cm de diâmetro para adensamento.

**Tabela 18: Método de adensamento por classes de consistência.**

Classe	Abatimento(mm)	Método de adensamento
S10	$10 \leq A < 50$	Mecânico
S50	$50 \leq A < 100$	Mecânico ou Manual
S100	$100 \leq A < 160$	
S160	$160 \leq A < 200$	Manual
S220	$A \geq 220$	

FONTE: Adaptado de NBR 5738:2015

Ainda em relação a NBR 5738, o adensamento do concreto nos respectivos moldes deve seguir um número de camadas e um número de golpes que corresponda ao que determina a Tabela 19.

**Tabela 19: Número de camadas para moldagem dos corpos de prova**

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

<sup>a</sup> Para concretos com abatimento superior a 160 mm, a quantidade de camadas deve ser reduzida à metade da estabelecida nesta Tabela. Caso o número de camadas resulte fracionário, arredondar para o inteiro superior mais próximo.

- No caso de dimensão básica de 450 mm, somente é permitido adensamento mecânico

FONTE: Adaptado de NBR 5738 (2015).

### 3. Materiais e Métodos

O estudo experimental realizado buscou evidenciar a potencialidade da substituição do agregado miúdo produzido na região metropolitana do Rio de Janeiro por pó de pedra da mesma região na composição do concreto. As seções seguintes expõem de forma detalhada os procedimentos utilizados.

A metodologia para a obtenção do concreto foi essencialmente empírica, uma vez que buscou-se evidenciar o desempenho do concreto a partir de diferentes substituições de agregado miúdo natural por agregado artificial, fixando a trabalhabilidade do concreto fresco dentro da faixa estudada e a classe de resistência aos 28 dias de idade.

Todo o programa laboratorial foi executado com apoio do laboratório da Votorantim e de Laboratório parceiros, utilizando os equipamentos disponíveis para a realização dos ensaios.

Para isso, foram feitas as seguintes determinações:

Caracterização do agregado miúdo;

Caracterização do agregado miúdo;

Caracterização do cimento;

Ensaio para a verificação das propriedades do concreto no estado fresco:

- consistência (NBR NM 67:98);
- moldagem dos corpos de prova;

### 3.1 Materiais

Os agregados, gráudo e miúdo, utilizados neste trabalho foram coletados numa cidade da região metropolitana do Rio de Janeiro, chamada de Seropédica, com população aproximada de 78mil habitantes.

Para melhor compreensão dos resultados, foram utilizadas nomenclaturas específicas para facilitar o entendimento dos resultados obtidos. Os devidos potenciais de substituição, encontram-se na Tabela 20 juntamente com sua respectiva nomenclatura.

**Tabela 20: Potenciais de substituição da areia natural por pó de pedra**

Porcentagem de Substituição (%)	Dosagem
0	A
10	B
20	C
30	D
40	E
50	F

Nota: Potenciais obtidos experimentalmente durante a construção da curva de Abrams.

#### 3.1.1 Cimento

Para desenvolvimento da pesquisa foi utilizado o cimento de Alto Forno (CP III 40-RS), por se tratar de um material de fácil disponibilidade no mercado da região Sudeste do Brasil. Sua principal ocorrência está ligada a aplicações onde é requerido maior controle do calor de hidratação, bem como resistência a ataques por sulfatos, podendo ainda ser aplicado em diversas obras onde não há solicitações em baixas idades.

Para avaliar as propriedades cimento CP III 40-RS, foram realizados ensaios de caracterização físico-química, com resultados descrito nas tabelas 21 e 22. A análise

granulométrica a laser, foi determinada por um granulômetro CILAS 920L, e demonstrada na figura 19, apresentando diâmetro das porcentagens acumuladas em  $\mu\text{m}$ , correspondentes a 10, 50 e 90%.

**Tabela 21: Boletim de Ensaios Químicos do cimento CP III 40 RS**

Ensaio	Métodos de ensaio	Resultados % mássicos	Limites da NBR 5735/91
Perda ao fogo - PF	NBR NM 18/12	2,44	$\leq 4,5 \%$
Óxido de magnésio - MgO	NBR 14656/01	3,63	**
Anidrido sulfúrico - SO <sub>3</sub>	NBR NM 16/12	3,02	$\leq 4,0 \%$
Resíduo insolúvel - RI	NBR NM 15/12	0,95	$\leq 1,5 \%$

Fonte: Votorantim Cimentos

**Tabela 22: Boletim de Ensaios Físicos e Mecânicos do cimento CP III 40 RS**

Ensaio	Métodos de ensaio	Resultados	Limites da NBR 5735/91
Finura - resíduo na peneira #200 (%)	NBR 11579/12	0,42	$\leq 8,0 \%$
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 23/01	2,97	N/A
Área específica (cm <sup>2</sup> /g)	NBR NM 76/98	4525	N/A
Água da pasta de consistência normal (%)	NBR NM 43/03	31,8	N/A
Início de pega (min)	NBR NM 65/03	220	$\geq 60$
Fim de pega (min)	NBR NM 65/03	300	$\leq 600$
Expansibilidade de Le Chatelier - a quente (mm)	NBR 11582/12	0	$\leq 5\text{mm}$

**Resistência à compressão (MPa) - (NBR 7215/96)**

Idade (dias)	Corpo de prova				Média	Desvio relativo máximo (%)	Limites da NBR 5735/91
	1	2	3	4			
3	20,7	20,7	20,2	19	20,2	5,7	$\geq 12,0 \text{ MPa}$
7	34,4	33,3	34,2	33	33,7	2	$\geq 23,0 \text{ MPa}$
28	52,3	54,3	52,3	52,2	52,8	2,9	$\geq 40,0 \text{ MPa}$

Fonte: Votorantim Cimentos

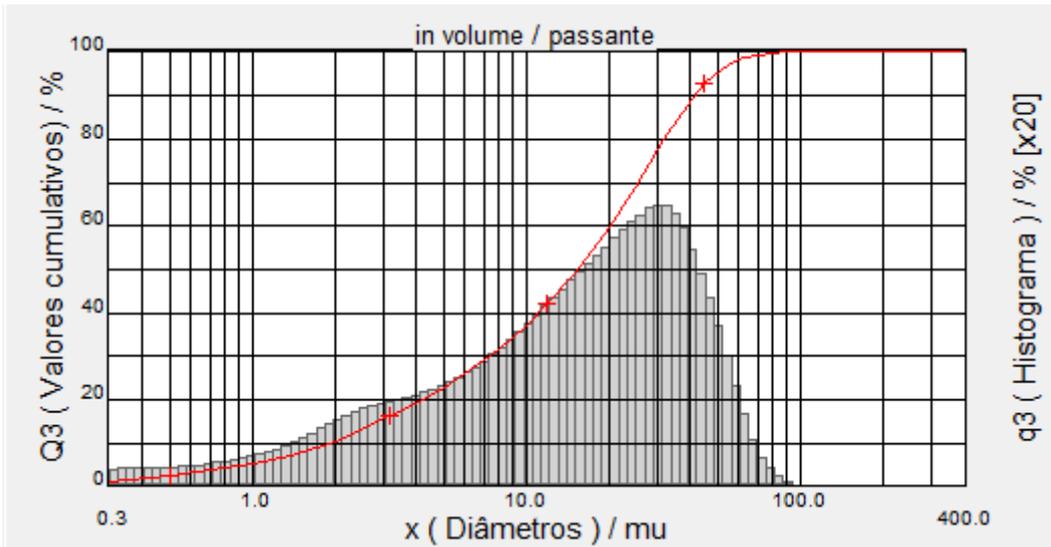


Figura 19: Ensaio granulométrico do cimento CP III 40 RS, realizada por analisador de partículas CILAS - 920L; Fonte: Votorantim Cimentos

### 3.1.2 Agregados

Os agregados miúdos (areia natural e pó de pedra) utilizados neste trabalho foram coletados na cidade de Seropédica-RJ, previamente secos ao ar, homogeneizado e analisados como estabelecido pelas normas apresentadas na Tabela 23.

O pó de pedra, produzido na unidade de agregado da Votorantim Cimentos é proveniente do processo de extração e britagem de rochas metamórficas (granito gnaisse) e podem ser observados na figura 20.

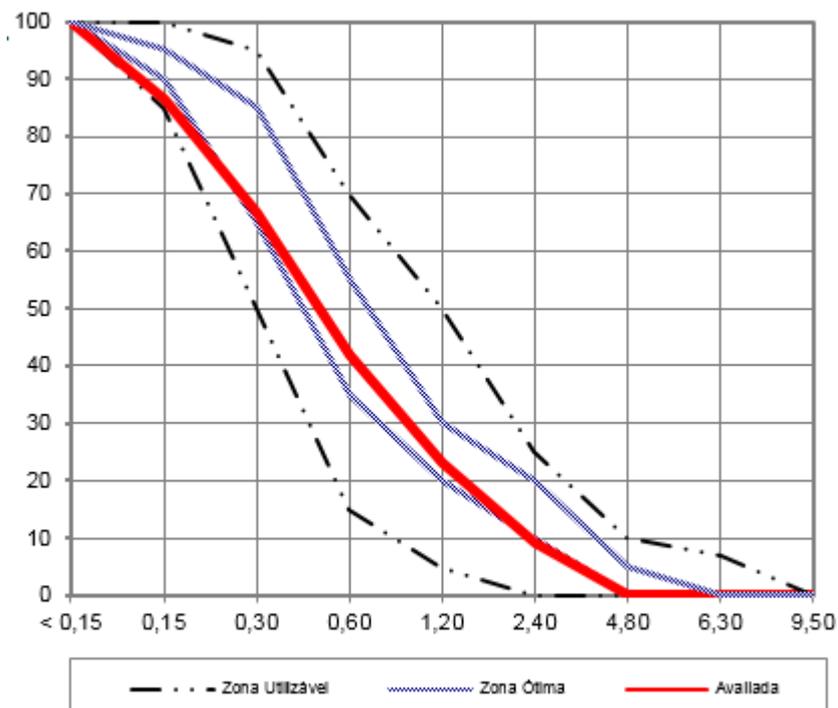


Figura 20: Pó de pedra analisado e sua faixa granulométrica

Tabela 23: Caracterização do agregado miúdo estudado (Pó de pedra)

Características do Material	Unidade	Obtidas	Especificadas	Metodologia de Ensaio
- Módulo de finura		2,27	N.E.	NBR - NM 248
- Dimensão Máxima	m m	4,80	N.E.	NBR - NM 248
- Massa Específica	g / cm <sup>3</sup>	2,67	N.E.	NBR - NM 52
- Massa Unitária	Kg / dm <sup>3</sup>	1,68	N.E.	NBR - NM 45
- Absorção de Água	( % )	1,14%	N.E.	NBR - NM 30
- Material Pulverulento	( % )	9,48%	N.E.	NBR - NM 46

Areia Natural utilizada na composição com o agregado miúdo de britagem foi coletada na cidade de Seropédica, em seguida peneirada e lavada para retirada de impurezas como madeira, folhas, gravetos, grumos de argila, fezes de animais e posteriormente secas ao ar. Após secagem, o material, foi novamente peneirado para a eliminação dos grumos formados e estocado até sua utilização. A figuras 21 e tabela 24 apresentam características físicas e distribuição granulométrica da areia utilizada na pesquisa.

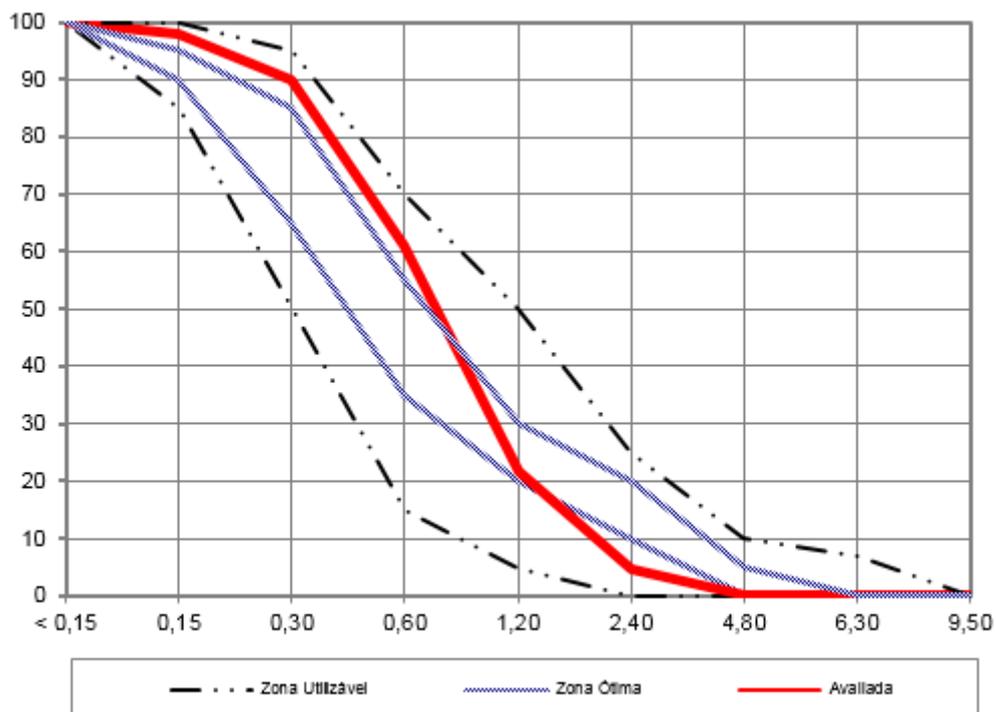


Figura 21: Granulometria da areia natural estudada

Tabela 24: Caracterização do agregado miúdo estudado (Areia Natural)

Características do Material	Unidade	Obtidas	Especificadas	Metodologia de Ensaio
- Módulo de finura		2,76	N.E.	NBR - NM 248
- Dimensão Máxima	m m	2,40	N.E.	NBR - NM 248
- Massa Específica	g / cm <sup>3</sup>	2,63	N.E.	NBR - NM 52
- Massa Unitária	Kg / dm <sup>3</sup>	1,42	N.E.	NBR - NM 45
- Absorção de Água	( % )	0,38	N.E.	NBR - NM 30
- Material Pulverulento	( % )	0,74	N.E.	NBR - NM 46

Agregado Graúdo utilizada no estudo, possui a mesma origem do agregado miúdo (pó de pedra) e a sua caracterização foi composta pela metodologia de ensaios segundo as Tabelas 24, 25 e 26, A figuras 22 e 23 apresentam a distribuição granulométrica dos agregados utilizados na pesquisa.

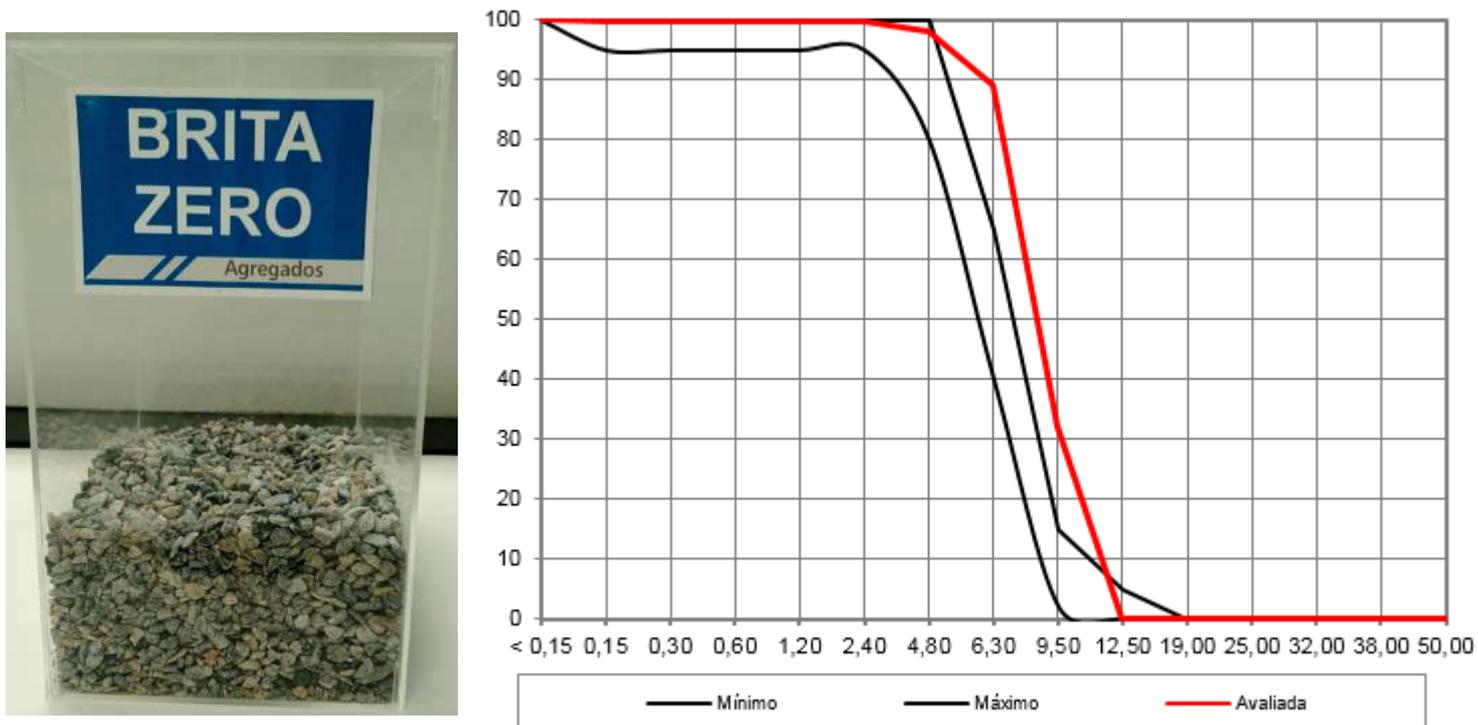


Figura 22: Brita 0 analisada e sua faixa granulométrica

Tabela 25: Caracterização do agregado graúdo estudado (Brita 0)

Características do Material	Unidade	Obtidas	Especificadas	Metodologia de Ensaio
- Módulo de finura		6,28	N.E.	NBR - NM 248
- Dimensão Máxima	m m	12,50	N.E.	NBR - NM 248
- Massa Específica	g / cm <sup>3</sup>	2,70	N.E.	NBR - NM 52
- Massa Unitária	Kg / dm <sup>3</sup>	1,49	N.E.	NBR - NM 45
- Absorção de Água	( % )	2,80	N.E.	NBR - NM 30
- Material Pulverulento	( % )	2,00	N.E.	NBR - NM 46

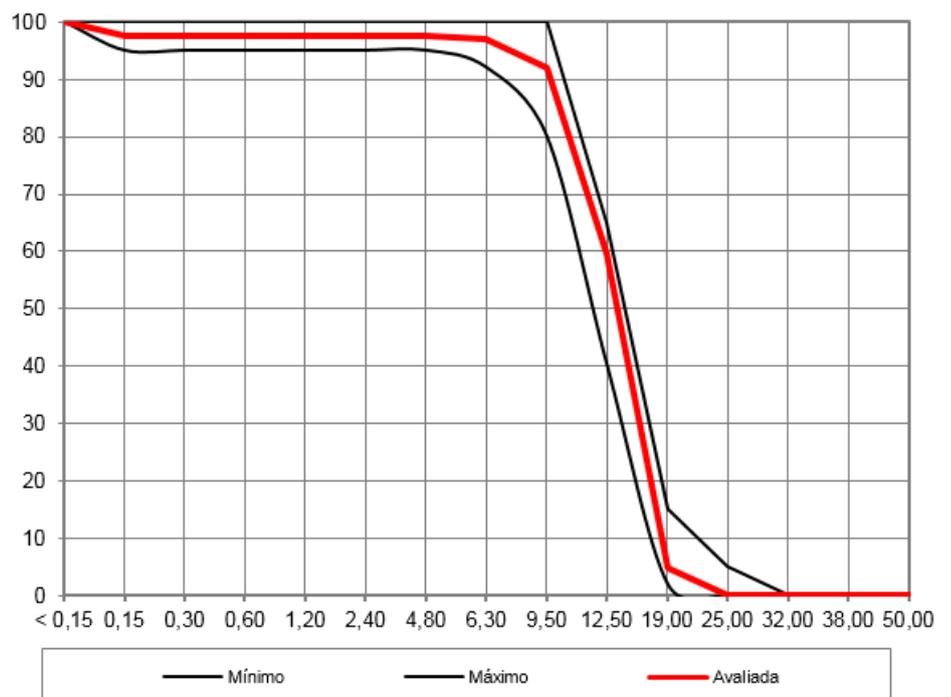


Figura 23: Brita 1 analisada e sua faixa granulométrica

Tabela 26: Caracterização do agregado graúdo estudado (Brita 1)

Características do Material	Unidade	Obtidas	Especificadas	Metodologia de Ensaio
- Módulo de finura		6,82	N.E.	NBR - NM 248
- Dimensão Máxima	m m	19,00	N.E.	NBR - NM 248
- Massa Específica	g / cm <sup>3</sup>	2,80	N.E.	NBR - NM 52
- Massa Unitária	Kg / dm <sup>3</sup>	1,69	N.E.	NBR - NM 45
- Absorção de Água	( % )	1,18	N.E.	NBR - NM 30
- Material Pulverulento	( % )	0,80	N.E.	NBR - NM 46

### 3.1.3 Aditivos

Aditivo Plastificante e a dosagem utilizada no concreto com pó de pedra nesta etapa do trabalho foi definido com apoio do fabricante, para aumentar o índice de consistência do concreto, mantendo a demanda d'água.

Dentre os benefícios esperados com a utilização deste aditivo, destaca-se a redução da água e a melhoria da trabalhabilidade do concreto.

### 3.1.4 Traço utilizado

O método de dosagem utilizado para a mistura de concreto, foi o ACI 211– Institute Standard Practice, descrito em “2.7.2.2 Condições de exposição e operação”.

#### 3.1.4.1 Ferramentas

- Balança aferida com capacidade de 120 kg;
- Balde para acondicionar a água e o aditivo;
- Proveta graduada para dosagem do aditivo;
- Betoneira de capacidade de 100 litros;
- Concha para concreto;
- Balde resistente para pesagem do material;
- Proveta graduada para medir água;
- Cronômetro para medir o tempo de mistura.
- Molde para o corpo-de-prova
- Haste de compactação com seção circular;
- Conjunto de Slump Test (tronco de cone, placa da base para apoio do molde)

A sequência de mistura do material na betoneira seguiu a seguinte ordem, como descrito na NBR 12821.

- i. Adicionou-se a massa total dos agregados graúdos;
- ii. Parte da água de amassamento, aproximadamente  $\frac{1}{3}$  do volume, acionar a betoneira durante 30 segundos;
- iii. Adicionou-se a massa total do cimento e mais aproximadamente  $\frac{1}{3}$  do volume da água, acionar a betoneira durante 30 segundos;
- iv. Adicionou-se a massa do agregado miúdo e o restante da água e acionou-se a betoneira durante o tempo necessário para garantir a homogeneidade e trabalhabilidade do concreto.
- v. Por fim, adicionou-se a massa do aditivo

#### 3.1.4.2 Moldagem dos corpos de prova

Conforme estabelecido pela NBR 5738, foram moldados 240 corpos de prova, sendo 40 corpos de prova para o traço referência e 200 para as composições (10%, 20%, 30%, 40% e 50%), a Figura 24 retrata uma das baterias de testes.



Figura 24: Modalgem dos corpos de prova como descrito pela NBR 5738;

A quantidade do aditivo plastificante utilizado foi de 0,9% em relação a massa de cimento para cada traço. O abatimento para o concreto de referência e os demais, foi fixado em  $10\pm 2\text{cm}$  e à medida que necessário foi feito a correção pelo acréscimo de água e quando necessário, recalculada a relação água/cimento utilizada.

Após a moldagem, os corpos de prova foram levados à cura em tanques de água durante todas as idades.

#### 3.1.4.3 Ensaio de consistência

Os ensaios de consistência foram realizados seguindo as recomendações da NBR NM 67, todos os traços tiveram a faixa de trabalhabilidade fixa em  $10\pm 2\text{cm}$ , a Figura 25 mostra o ensaio com dispositivo adaptado para melhor entendimento do adensamento do material estudado.



Figura 25: Ensaio de consistência pelo método de Slump

#### 3.1.4.4 Ensaio de resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão simples dos corpos de prova cilíndricos(10x20cm) foram realizados no laboratório da Votorantim Cimentos, a Figura 26 demonstra o ensaio, seguindo as indicações da norma NBR 5739.



Figura 26: ensaios de resistência à compressão simples

As misturas dos concretos que incorporaram pó de pedra foram estabelecidas fazendo-se a compensação de volumes dos materiais, uma vez que o pó de pedra apresenta maior massa específica que as areias naturais.

#### 3.1.5 Investigações de dosagens – Composição de Areias

Previamente, foi realizado em laboratório o estudo da granulometria dos agregados miúdos e areia natural descrito no capítulo 3 (3.1.3 Agregados).

Os agregados miúdos natural e artificial compuseram uma mescla de até 50% de substituição para cada um deles, que foi sendo substituída pelos percentuais crescentes de 10%, visando sempre atender os limites de distribuição granulométrica estabelecidos pela NBR 7211, demonstrando que os agregados miúdos utilizados encontram-se dentro da zona utilizável.

## 4. Resultados e discussões

### 4.1 Caracterização dos Materiais

A caracterização dos materiais foi de grande importância no estudo para a substituição parcial de areia natural, visto que este parâmetro exerce grande influência nas propriedades e características dos concretos.

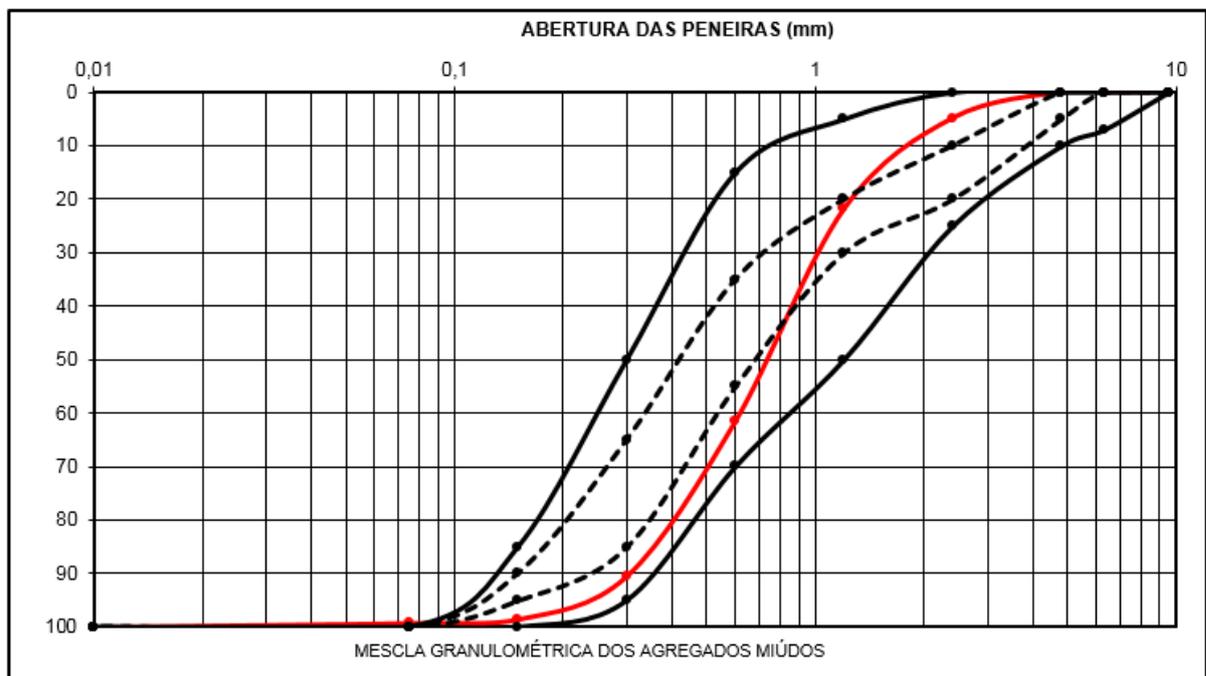
Uma breve análise da tabela 27, comprovam que a curva granulométrica atende os requisitos definidos pela NBR 7211:2009 para sua utilização em concretos, mas somente a peneira 1,2mm enquadra-se na faixa ótima.

**Tabela 27: Composição granulométrica do agregado miúdo - Dosagem A**

COMPOSIÇÃO IDEAL DOS AGREGADOS MIÚDOS									
Abertura das peneiras (mm)	AREIA A		AREIA B		Mescla	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Retido acumulado		Retido acumulado			Limites Inferiores		Limites Superiores	
						Zona útil	Zona ótima	Zona ótima	Zona útil
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
<b>6,3</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	7
4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	5	10
2,4	4,9	4,9	9,2	0,0	4,9	0	10	20	25
1,2	21,8	21,8	23,1	0,0	21,8	5	20	30	50
0,6	61,5	61,5	41,7	0,0	61,5	15	35	55	70
0,3	90,5	90,5	66,6	0,0	90,5	50	65	85	95
0,15	98,6	98,6	86,4	0,0	98,6	85	90	95	100
0,075	99,3	99,3	96,7	0,0	99,3	100	100	100	100
Fundo	100,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100	100	100	100
(%)	<b>100</b>		<b>0</b>		<b>100%</b>	<b>Modulo de finura</b>			<b>2,77</b>

Para complementar a análise granulométrica apresentada na Tabela 27, e corroborando com a proposta de Neville (1997), são usadas curvas granulométricas, que facilitam a interpretação dos resultados encontrados.

Conforme apresentado na figura 27, os mesmos agregados apresentam uma distribuição contínua enquadrando-se na zona utilizável determinada pela NBR 7211 para os agregados miúdos, mas fica claro que ainda existe grande potencial de melhoria, que serão comprovados nos ensaios seguintes e sacramentado pelos ensaios mecânicos realizados e evidenciados pelas curvas de Abrams.



**Figura 27: Curva granulométrica do agregado miúdo - Dosagem A**

Para construção das curvas de Abrams, que contribuiram para análise do material estudado, foi utilizado uma família de traços com faixa de abatimento em  $10 \pm 2$  cm, iniciando-se pela dosagem A expressa pela Figura 28.

Com o auxílio da Figura 29, que evidencia o abatimento alcançado pelas famílias de dosagem A, pode-se verificar que todas apresentaram o abatimento esperado, nada mais justo por se tratar de traços de referência, vale evidenciar ainda que todas as 4 famílias avaliadas tiveram a quantidade de água fixa em 190L.

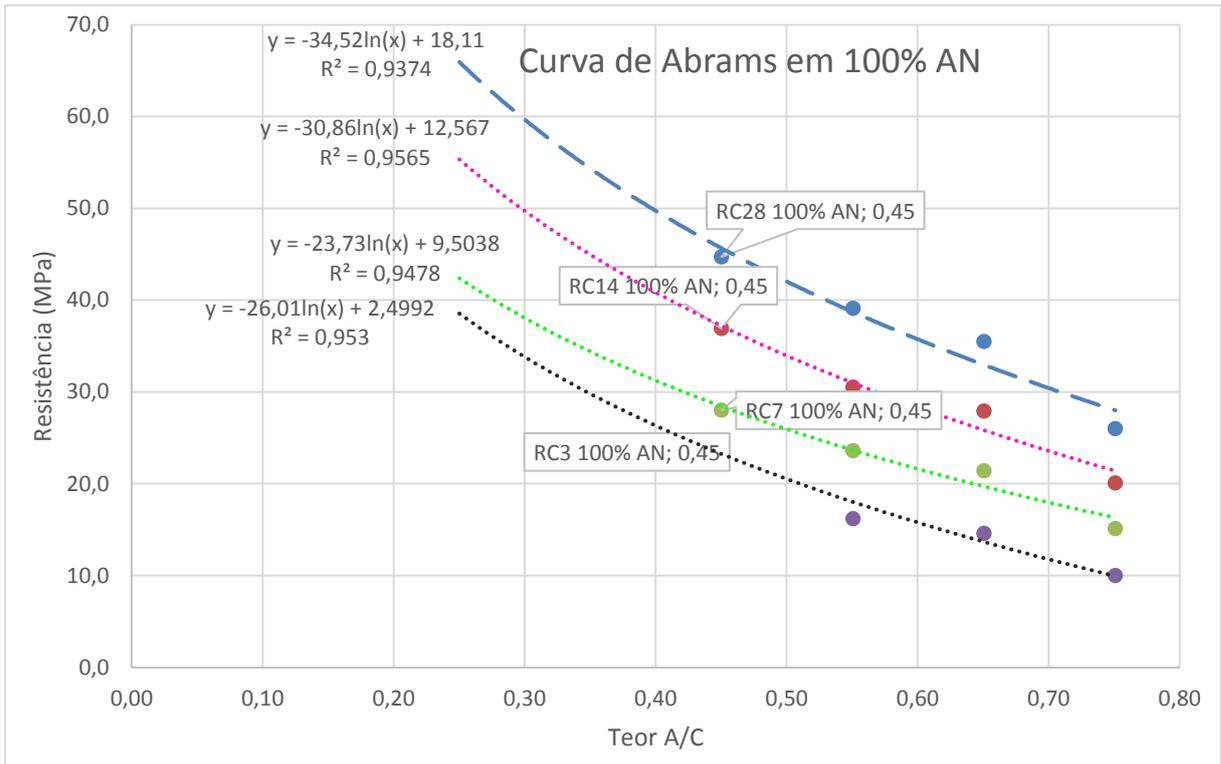


Figura 28: Curva de Abrams para Dosagem A



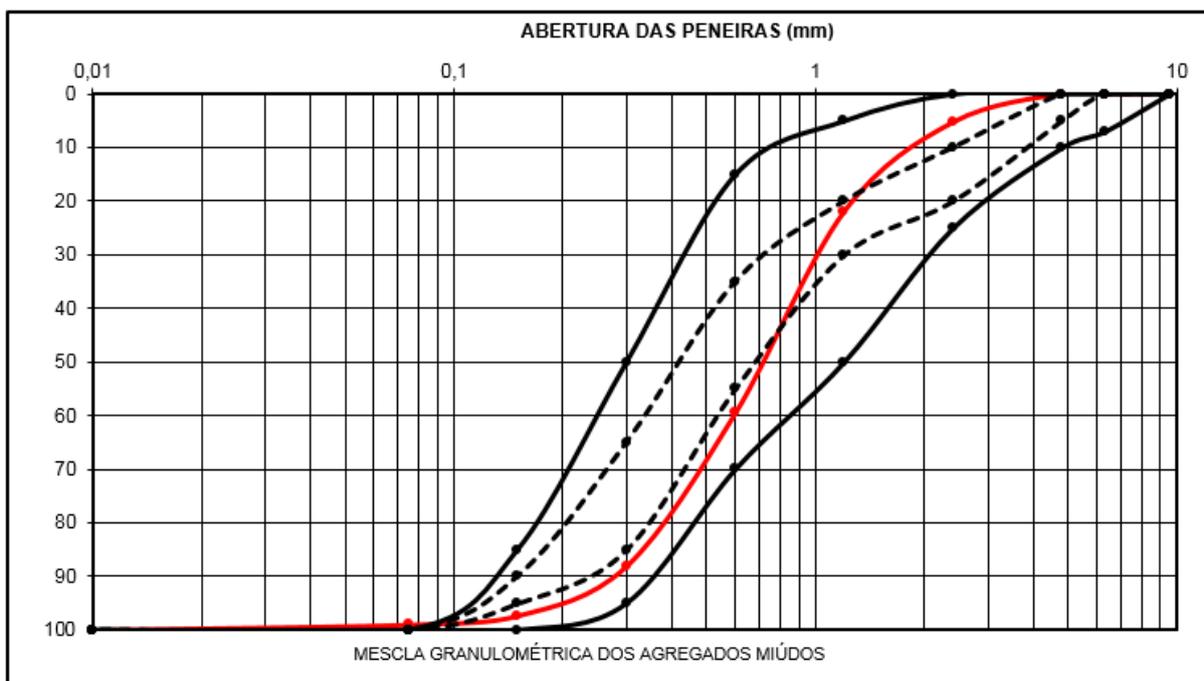
Figura 29: Trabalhabilidade em função da adição - Dosagem A

Dosagem B– Composição 90x10% Areia Natural(A.N) x Areia Artificial(A.A)

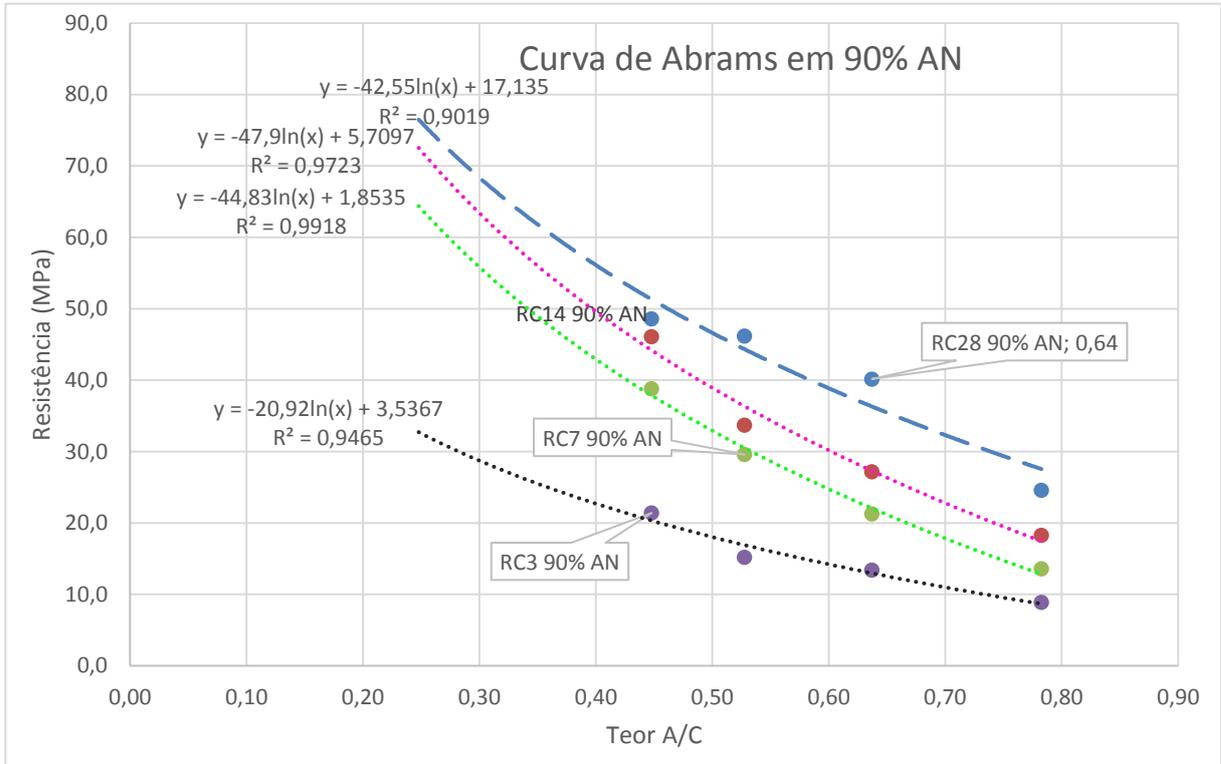
A caracterização desta dosagem não mostra diferenças significativas na composição dos finos quando analisada apenas pela zona utilizável determinada pela NBR 7211, como ilustrada na tabela 28, no entanto, a contribuição da parte fina presente na areia artificial, mais precisamente o material passante na peneira 0,075mm (Material Pulverulento), contribuiu para um concreto com maior compactidade e resistência mecânica.

**Tabela 28: Composição granulométrica do agregado miúdo - Dosagem B**

COMPOSIÇÃO IDEAL DOS AGREGADOS MIÚDOS									
Abertura das peneiras (mm)	AREIA A		AREIA B		Mescla	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Retido acumulado		Retido acumulado			Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Zona útil	Zona ótima	Zona ótima	Zona útil		Zona útil	Zona ótima	Zona ótima	Zona útil
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
<b>6,3</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	7
4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	5	10
2,4	4,9	4,4	9,2	0,9	5,3	0	10	20	25
1,2	21,8	19,6	23,1	2,3	21,9	5	20	30	50
0,6	61,5	55,3	41,7	4,2	59,5	15	35	55	70
0,3	90,5	81,4	66,6	6,7	88,1	50	65	85	95
0,15	98,6	88,7	86,4	8,6	97,3	85	90	95	100
0,075	99,3	89,3	96,7	9,7	99,0	100	100	100	100
Fundo	100,0	90,0	100,0	10,0	100,0	100	100	100	100
(%)	<b>90</b>		<b>10</b>		<b>100%</b>	<b>Modulo de finura</b>			<b>2,72</b>



**Figura 30: Curva granulométrica do agregado miúdo - Dosagem B**



**Figura 31: Curva de Abrams para Dosagem B**

A curva de Abrams representada pela Figura 31, pode nos mostrar tal contribuição das partículas finas a Dosagem B, o preenchimento dos vazios deixados na estrutura pelas partículas graúdas, foi reduzido, deixando um menor espaço para a água. E a trabalhabilidade foi mantida no intervalo desejado com expresso pela Figura 32.



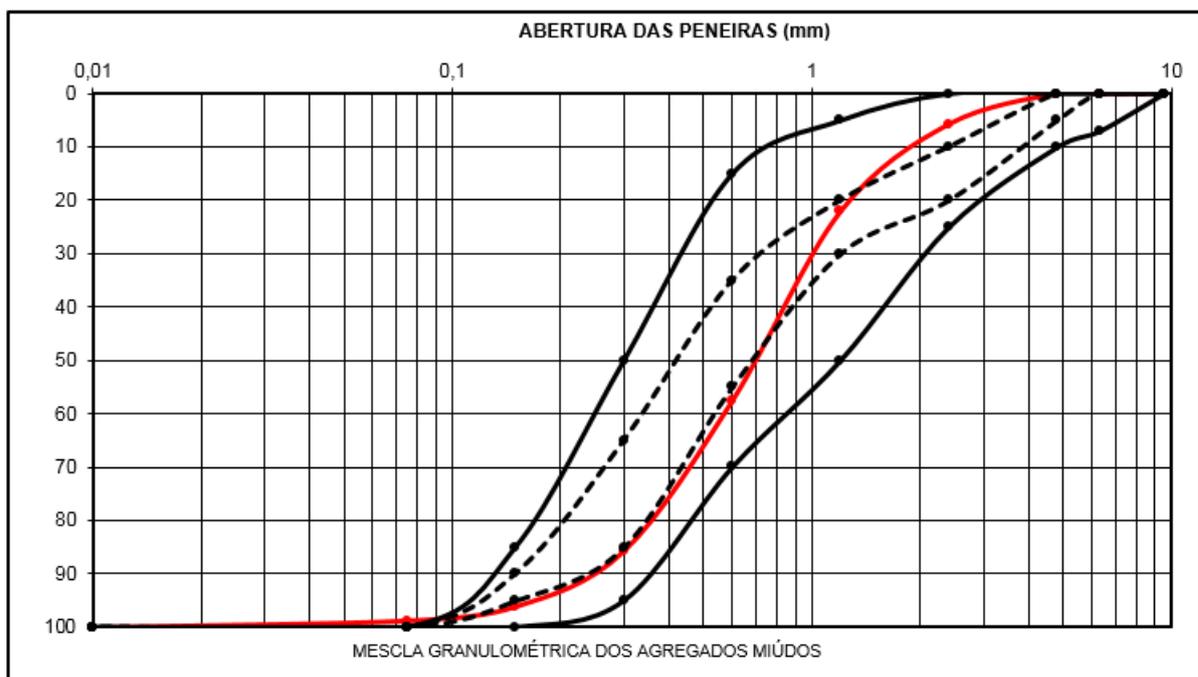
**Figura 32: Trabalhabilidade em função da adição - Dosagem B**

Dosagem C – Composição 80x20% Areia Natural(A.N) x Areia Artificial(A.A)

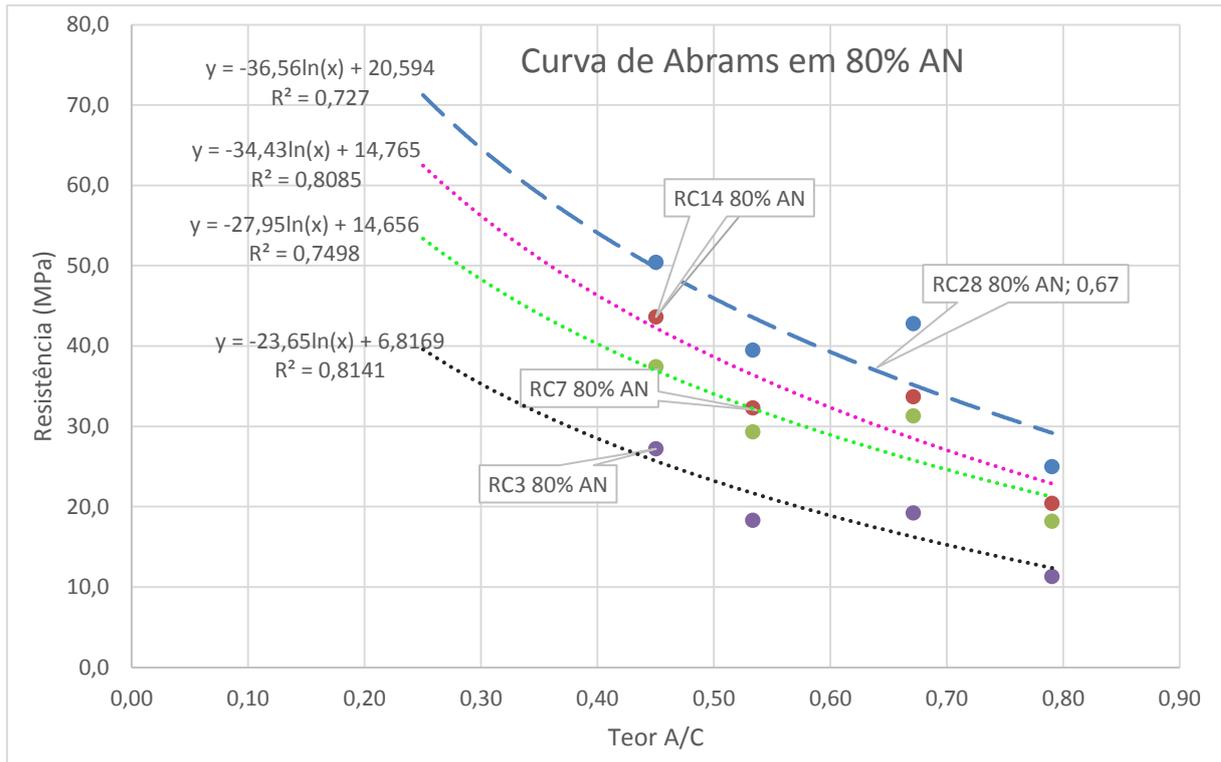
A caracterização desta dosagem se aproxima ligeiramente da zona ótima para agregados miúdos que pode ser facilmente observado pela Figura 33, salvo apenas pela fração mais grossa de 2,4mm, que não se aproximou nem mesmo do limite inferior, resultados que se repetirão em todas as dosagens.

**Tabela 29: Composição granulométrica do agregado miúdo - Dosagem C**

COMPOSIÇÃO IDEAL DOS AGREGADOS MIÚDOS									
Abertura das peneiras (mm)	AREIA A		AREIA B		Mescla	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Retido acumulado		Retido acumulado			Limites Inferiores		Limites Superiores	
						Zona útil	Zona ótima	Zona ótima	Zona útil
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
<b>6,3</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	7
4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	5	10
2,4	4,9	3,9	9,2	1,8	5,7	0	10	20	25
1,2	21,8	17,4	23,1	4,6	22,1	5	20	30	50
0,6	61,5	49,2	41,7	8,3	57,5	15	35	55	70
0,3	90,5	72,4	66,6	13,3	85,7	50	65	85	95
0,15	98,6	78,9	86,4	17,3	96,1	85	90	95	100
0,075	99,3	79,4	96,7	19,3	98,8	100	100	100	100
Fundo	100,0	80,0	100,0	20,0	100,0	100	100	100	100
(%)	<b>80</b>		<b>20</b>		<b>100%</b>	<b>Modulo de finura</b>			<b>2,67</b>



**Figura 33: Curva granulométrica do agregado miúdo - Dosagem C**



**Figura 34: Curva de Abrams para Dosagem C**

De forma semelhante, a curva de Abrams representada pela Figura 34, mostra um aumento no preenchimento dos vazios deixados na estrutura pelas partículas graúdas, e neste caso em particular, permitindo uma redução de consumo de cimento caso fosse o objetivo deste trabalho, analogamente a Dosagem B, a trabalhabilidade foi mantida no intervalo desejado, sendo comprovado pela Figura 35.

Ainda sobre a Figura 35, fica evidenciado um aumento significativo na demanda d'água para o traço de A/C 0,45, o que já era esperado devido a maior presença de finos na mistura, no entanto, este aumento proporcionou acréscimos de até 21% na resistência a compressão aos 28 dias do FcK 30.



Figura 35: Trabalhabilidade em função da adição - Dosagem C

Tabela 30: Composição granulométrica do agregado miúdo - Dosagem D

COMPOSIÇÃO IDEAL DOS AGREGADOS MIÚDOS									
Abertura das peneiras (mm)	AREIA A		AREIA B		Mescla	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Retido acumulado		Retido acumulado			Limites Inferiores		Limites Superiores	
						Zona útil	Zona ótima	Zona ótima	Zona útil
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
<b>6,3</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	7
4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	5	10
2,4	4,9	3,4	9,2	2,7	6,1	0	10	20	25
1,2	21,8	15,2	23,1	6,9	22,2	5	20	30	50
0,6	61,5	43,0	41,7	12,5	55,6	15	35	55	70
0,3	90,5	63,3	66,6	20,0	83,3	50	65	85	95
0,15	98,6	69,0	86,4	25,9	94,9	85	90	95	100
0,075	99,3	69,5	96,7	29,0	98,5	100	100	100	100
Fundo	100,0	70,0	100,0	30,0	100,0	100	100	100	100
(%)	<b>70</b>		<b>30</b>		<b>100%</b>	Modulo de finura			<b>2,62</b>

Dosagem D – Composição 70x30% Areia Natural(A.N) x Areia Artificial(A.A)

A caracterização desta dosagem atende em três peneiras as exigências da zona ótima para agregados miúdos, o módulo de finura vem acompanhando de forma inversa ao incremento na dosagem, o que ajuda a justificar a melhor distribuição de partículas graúdas e miúdas.

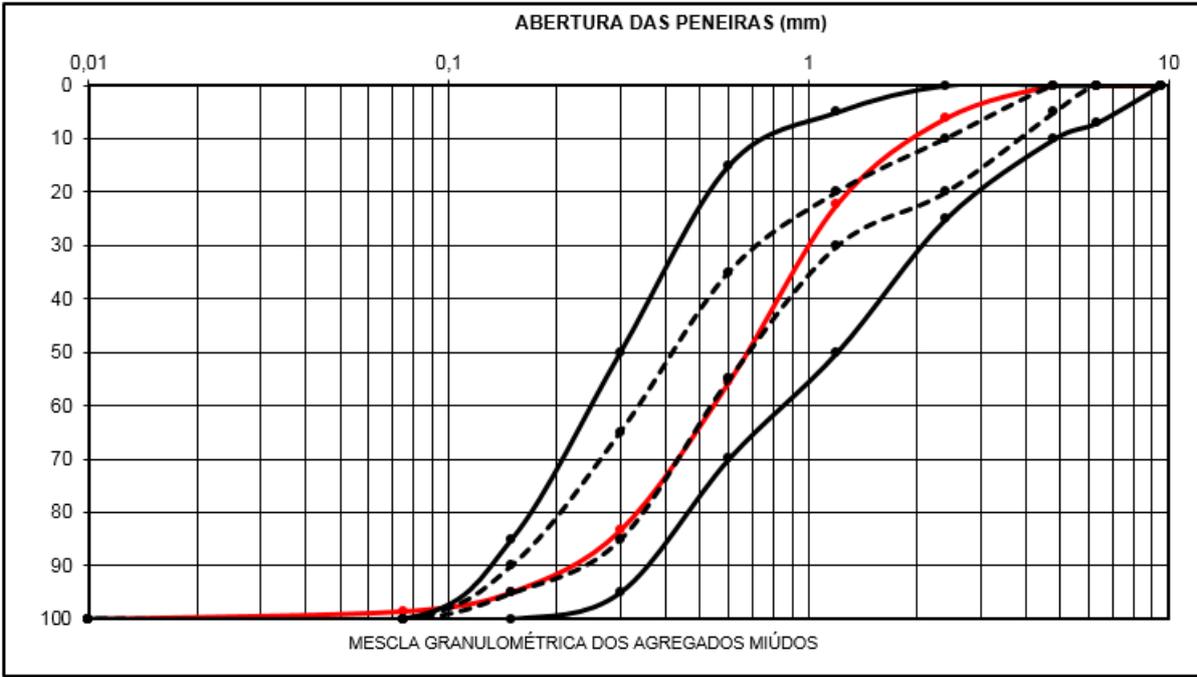


Figura 36: Curva granulométrica do agregado miúdo - Dosagem D

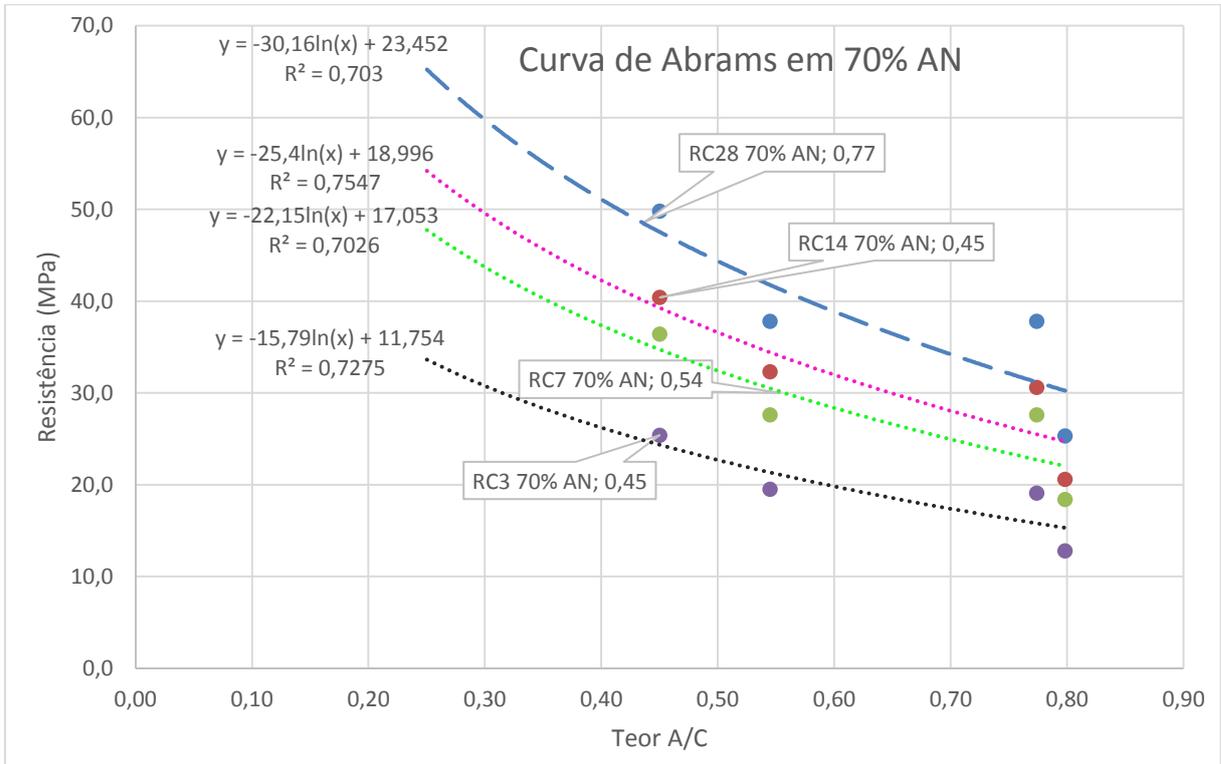


Figura 37: Curva de Abrams para Dosagem D

Mesmo apresentando pequenos desvios de 3% para menos no FcK 35 e 20, evidenciados pela Figura 37, todos traços atendem a resistência característica demandada e o objetivo se mantém em ambos os parâmetros estabelecidos, resistência e trabalhabilidade, este último podendo ser observado na Figura 38.



Figura 38: Trabalhabilidade em função da adição - Dosagem D

Tabela 31: Composição granulométrica do agregado miúdo - Dosagem E

COMPOSIÇÃO IDEAL DOS AGREGADOS MIÚDOS									
Abertura das peneiras (mm)	AREIA A		AREIA B		Mescla	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Retido acumulado		Retido acumulado			Limites Inferiores		Limites Superiores	
						Zona útil	Zona ótima	Zona ótima	Zona útil
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
<b>6,3</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	7
4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	5	10
2,4	4,9	2,9	9,2	3,7	6,6	0	10	20	25
1,2	21,8	13,1	23,1	9,3	22,3	5	20	30	50
0,6	61,5	36,9	41,7	16,7	53,6	15	35	55	70
0,3	90,5	54,3	66,6	26,6	80,9	50	65	85	95
0,15	98,6	59,1	86,4	34,5	93,7	85	90	95	100
0,075	99,3	59,6	96,7	38,7	98,2	100	100	100	100
Fundo	100,0	60,0	100,0	40,0	100,0	100	100	100	100
(%)	<b>60</b>		<b>40</b>		<b>100%</b>	<b>Modulo de finura</b>			<b>2,57</b>

Dosagem E – Composição 60x40% Areia Natural(A.N) x Areia Artificial(A.A)

A caracterização desta dosagem já se encontra quase toda dentro da zona ótima para agregados miúdos, salvo apenas pela fração mais grossa de 2,4mm, mencionado anteriormente, a Figura 39 permite uma fácil observação do atingimento da zona ótima.

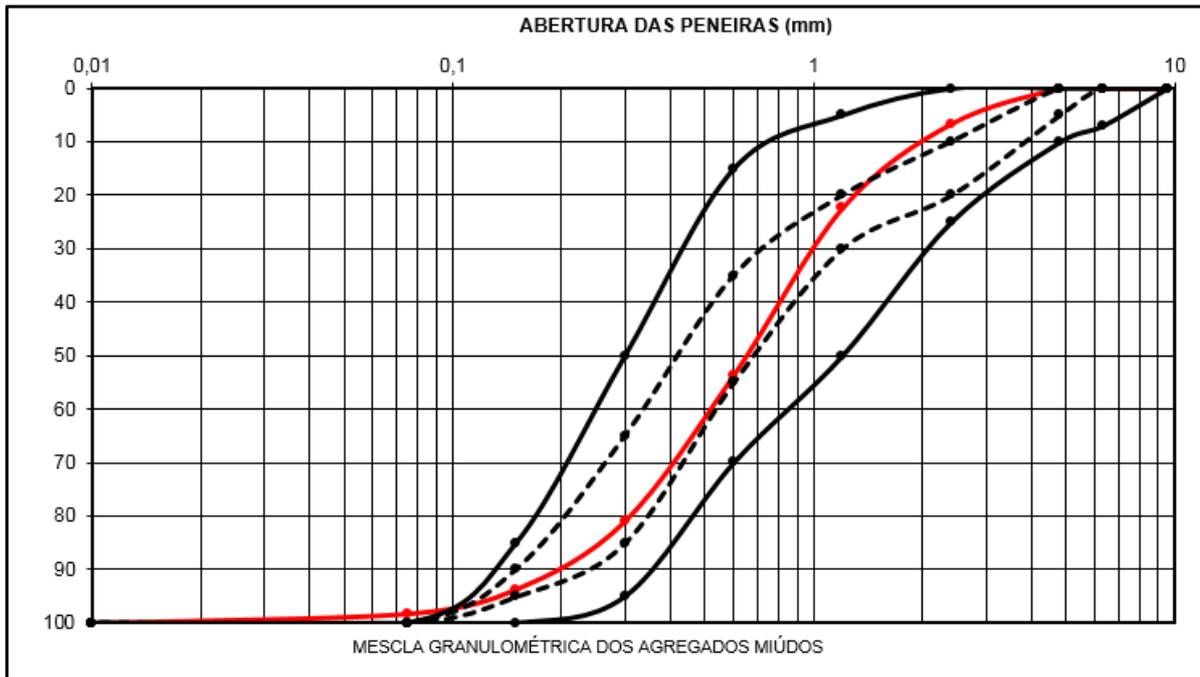


Figura 39: Curva granulométrica do agregado miúdo - Dosagem E

Mesmo apresentando resultados mais homogêneos para resistências a compressão das idades de 28 dias, houve pequena queda quando comparado ao traço referência, sendo novamente nos  $A/C_s$  mais elevados, e com todos traços atendendo a resistência característica demandada, como representado pela Figura 40.

A mesma homogeneidade se observou na trabalhabilidade, que segundo Carneiro (1999), se deve a otimização do empacotamento, que favorece o deslizamento das partículas maiores entre as menores, como observado na Figura 41.

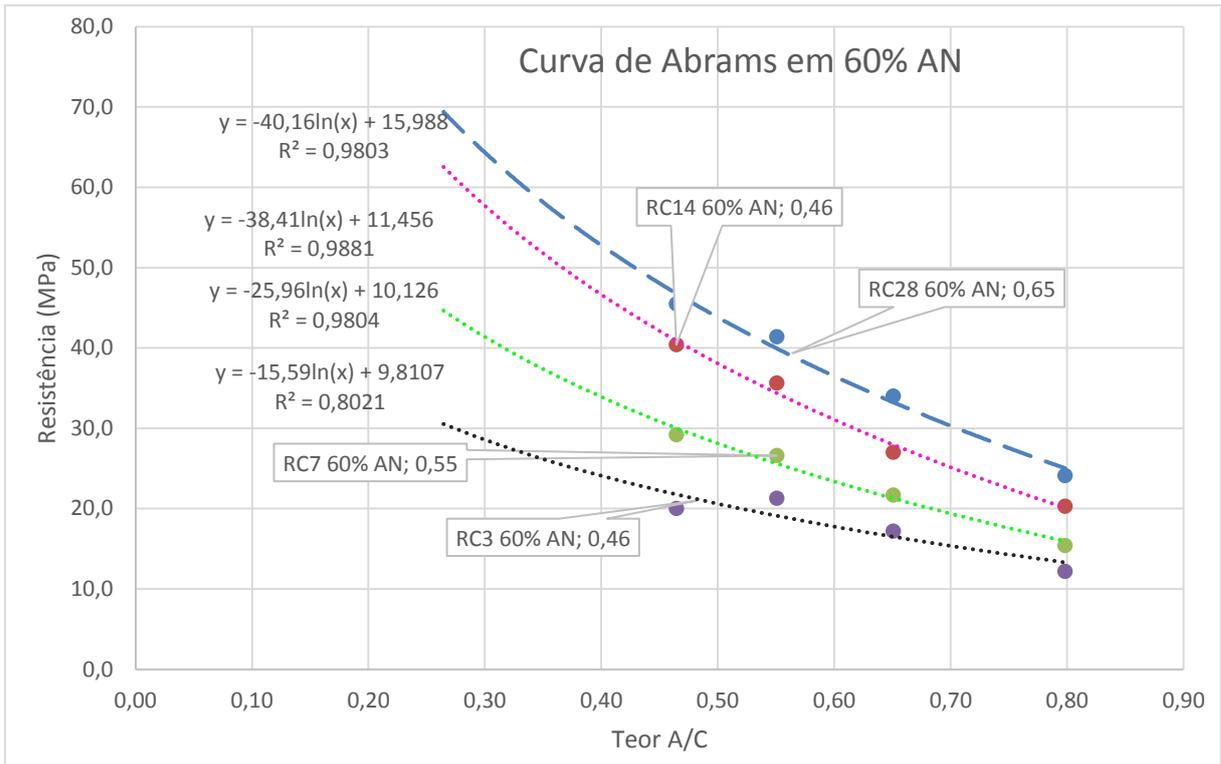


Figura 40: Curva de Abrams para Dosagem E



Figura 41: Trabalhabilidade em função da adição - Dosagem E

**Tabela 32: Composição granulométrica do agregado miúdo - Dosagem F**

COMPOSIÇÃO IDEAL DOS AGREGADOS MIÚDOS									
Abertura das peneiras (mm)	AREIA A		AREIA B		Mescla	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Retido acumulado		Retido acumulado			Limites Inferiores		Limites Superiores	
						Zona útil	Zona ótima	Zona ótima	Zona útil
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
<b>6,3</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	7
4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	5	10
2,4	4,9	2,4	9,2	4,6	7,0	0	10	20	25
1,2	21,8	10,9	23,1	11,6	22,5	5	20	30	50
0,6	61,5	30,7	41,7	20,9	51,6	15	35	55	70
0,3	90,5	45,2	66,6	33,3	78,5	50	65	85	95
0,15	98,6	49,3	86,4	43,2	92,5	85	90	95	100
0,075	99,3	49,6	96,7	48,4	98,0	100	100	100	100
Fundo	100,0	50,0	100,0	50,0	100,0	100	100	100	100
<b>(%)</b>	<b>50</b>		<b>50</b>		<b>100%</b>	<b>Modulo de finura</b>			<b>2,52</b>

#### Dosagem F – Composição 50x50% Areia Natural(A.N) x Areia Artificial(A.A)

Como visto na caracterização anterior, esta dosagem também se encontra quase toda dentro da zona ótima para agregados miúdos, apresentando certa aproximação da fração mais grossa da zona ótima, uma análise da Figura 42 sugere certo potencial para aumento da participação da areia artificial, no entanto, o concreto produzido com a Dosagem F apresentou um aspecto “pesado”, característica que sugere um limite para adição de areia artificial. Possivelmente um aditivo mais robusto permita um incremento maior desta areia artificial, tal adição não será avaliada neste trabalho.

Seguindo a mesma tendência apresentada na Dosagem E, os resultados de resistências a compressão das idades de 28 dias e a trabalhabilidade se mostraram mais homogêneos, com pequena redução de resistência nos traços de menor consumo de cimento e A/C<sub>s</sub> mais elevados, porém, todos traços estudados atenderam a resistência característica demandada, como representado pela Figura 43.

Este menor consumo de ligante da mistura e maior consumo de água, justificaria esta pequena redução de resistência nos traços.

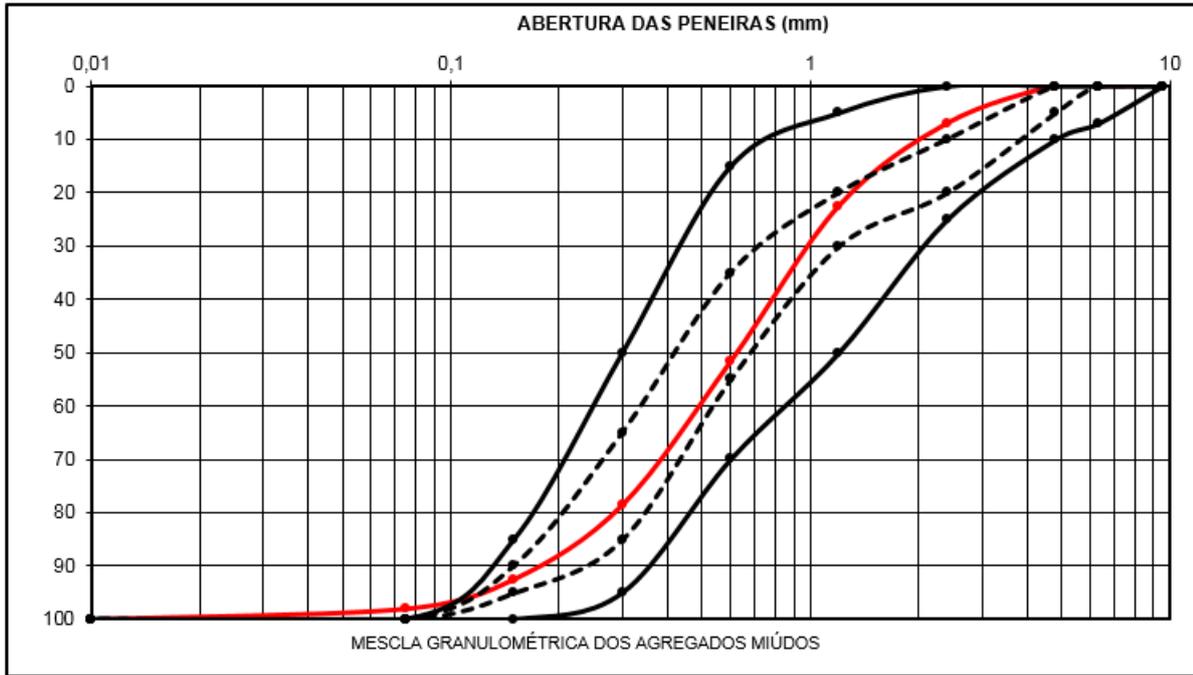


Figura 42: Curva granulométrica do agregado miúdo - Dosagem F

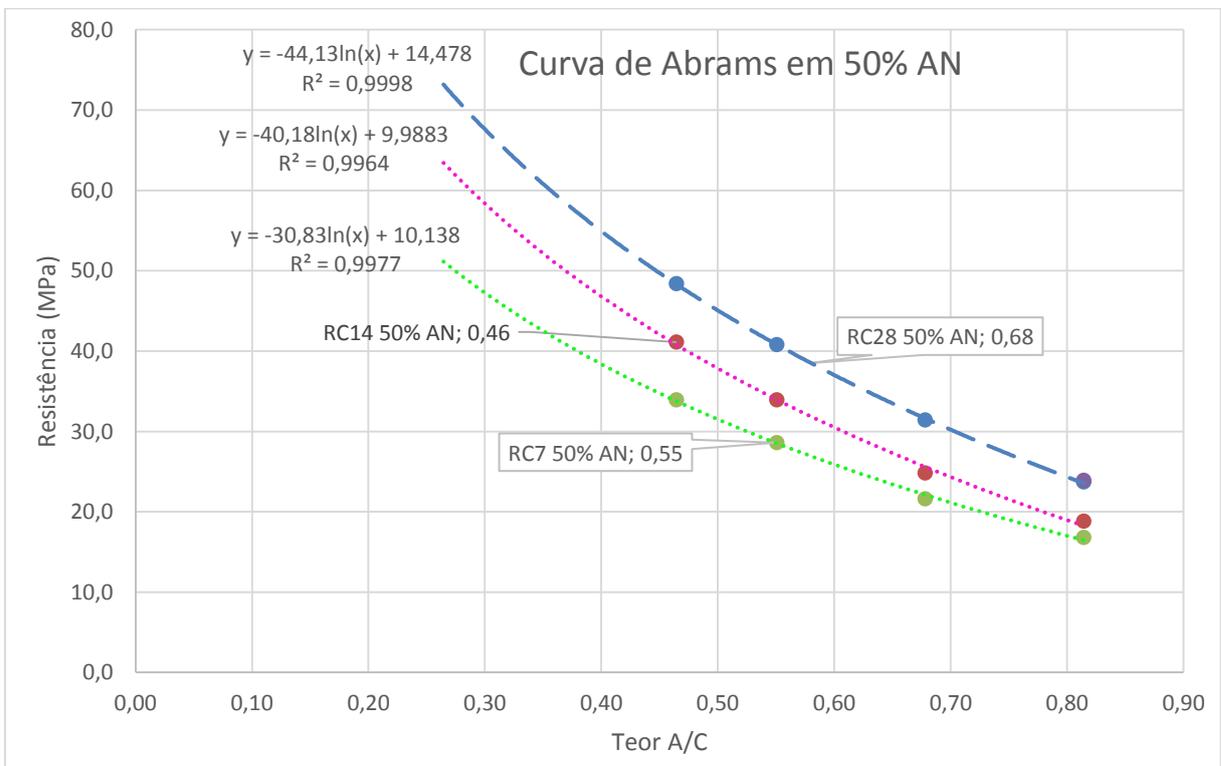


Figura 43: Curva de Abrams para Dosagem F



**Figura 44: Trabalhabilidade em função da adição - Dosagem F**

**Tabela 33: Característica do material estudado**

Composição	Módulo de Finura	Dimensão Máx.(mm)
Dosagem A	2,77	2,40
Dosagem B	2,72	4,80
Dosagem C	2,67	4,80
Dosagem D	2,62	4,80
Dosagem E	2,57	4,80
Dosagem F	2,52	4,80

## 5. Conclusão

De modo geral, os resultados obtidos nos experimentos realizados com areia artificial de granito gnaisse, em substituição parcial à areia natural de rio, para produção de concretos, permitiram concluir que as etapas propostas obtiveram sucesso, demonstrando a viabilidade e as vantagens da substituição da areia natural pelo pó de pedra nos concretos estudados, limitando-se ao teor máximo de 50% de substituição.

Permite ainda apontar que além dos avanços financeiros que a substituição pode proporcionar, a principal vantagem ao uso do pó de pedra, está relacionada ao aspecto ambiental, uma vez que sua utilização, mesmo que parcial, significa uma considerável redução aos danos causados pela extração da areia natural e a eliminação do passivo gerado pelas empresas produtoras de agregado. Num olhar mais específico, os resultados apresentados, em substituição parcial à areia natural, para produção de concreto, permitiram concluir que:

O pó de pedra estudado, possui todas as características necessárias à sua utilização para compor, juntamente com a areia natural, a faixa granulométrica apontada como ótima pela NBR 7211.

A areia natural normalmente utilizada para confecção de concreto na região estudada, apresentou uma dimensão máxima característica 2,4mm e um módulo de finura de 2,77, que combinado ao pó de pedra com dimensão máxima característica de 4,8mm e módulo de finura igual a de 2,27, resultou em um melhor empacotamento que pode ser evidenciado nas curvas granulométricas compostas por ambos os materiais e pelas características do material expressas na Tabela 34.

Quando avaliado em seu estado rígido, o concreto de resistência característica mais elevada (Fck 40 e Fck 35), apresentou acréscimo de resistência em quase todas as faixas de adição de areia artificial, quando comparado ao concreto produzido apenas com areia natural, evidenciado na Tabela 35. Isso se deve ao fato das partículas menores preencherem os vazios deixados pelas partículas maiores, deixando apenas um espaço mínimo para a água e proporcionando uma densidade de empacotamento mais alta, conduzindo a uma estrutura mais densa com menor

proporção de vazios e, portanto, mais resistente, como descrito anteriormente por Kwan e Mora (2002).

Outro ponto relevante do estado rígido (para os mesmos  $F_{ck}$ s mencionados acima), é que para alcançar a mesma resistência, seria necessário um menor consumo de cimento quando comparado ao concreto dosado apenas com areia natural (na grande maioria das adições), fato que contribui novamente com o aspecto ambiental, devido à redução de gases emitidos na produção de clínquer.

No que diz respeito à trabalhabilidade, o concreto com pó de pedra, apresentou maior demanda d'água, justificado pelo elevado teor de superfinos (9,48%), o que deixou a mistura "pesada", inviabilizando maiores adições do pó de pedra oriundo do granito gnaisse em seu estado in natura.

Conclui-se, que o pó de pedra deste estudo, em seu estado in natura, possui características que possibilitam o seu uso como material alternativo à areia natural, pois apresentou as características que é exigida a um agregado miúdo pela NBR 7211, e contribuiu com a melhora das propriedades do concreto estudado, além de reduzir, mesmo que de forma tímida, os impactos ambientais gerados no processo de extração de areia natural.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Aditivos mais tecnológicos podem contribuir no “deslizamento” das partículas, justificando assim, maiores adições, e a busca por aditivos que permitam tais adições será uma das sugestões para trabalhos futuros;
- O maior grau de empacotamento proporcionado pelo simples estudo da influência da curva granulométrica, sugere a produção de um concreto mais “fechado” com menor permeabilidade, e conseqüentemente menos sujeito a ataques externos, avaliar este grau de permeabilidade será outra sugestão de trabalhos futuros;
- Confeccionar concretos com maiores adições artificiais, onde a trabalhabilidade não seja um limitante para o estudo;
- Avaliar a possibilidade da adição de mais peneiras ao processo produtivo, visando a redução do teor de superfinos para adição em concreto e verificar o comportamento destes superfinos em fabricantes de argamassas;
- Avaliar a possibilidade da adição de escória de aciaria elétrica como agregado miúdo na produção de artefatos de concreto;

## 6. Referência Bibliográfica

ALMEIDA, I. R. **Concretos dosados em central, com areia 100% artificial**. *In: Anais do II SUFFIB – SEMINÁRIO: O uso da fração fina da britagem*. São Paulo, 2005.

ALMEIDA, JANAÍNA. **Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto**. 2008. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte.

American Concrete Institute – **ACI 211.5R-01, Guide for Submittal of Concrete Proportions**, Reported by ACI Committee 211

American Society for Testing and Materials - ASTM C125 – 16 **Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates**

American Society for Testing and Materials - ASTM C494 – 10 **Standard Specification for chemical admixtures for concrete**

American Society for Testing and Materials - ASTM C1679-09, **Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5732: **Cimento Portland Comum**. Rio de Janeiro, 1991

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5735: **Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **C Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - procedimento**. Rio de Janeiro, 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto** – Especificação, Rio de Janeiro, 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão** – Especificação, Rio de Janeiro, 1996

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7389-1- **Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto** - Parte 1: Agregado miúdo. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: **Concretos para fins estruturais** – Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1992. 2p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833: **“Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico”**, Rio de Janeiro, 2008

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: **“Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)”**, Rio de Janeiro: 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582: **“Cimento Portland — Determinação da expansibilidade Le Chatelier”**, Rio de Janeiro: 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768: **“Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos”**, Rio de Janeiro: 2011

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655 - **Concreto de Cimento Portland - Preparo, Controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12821 - **Preparação de concreto em laboratório - procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14656 - **Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 15: **Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel**. Rio de Janeiro, 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 16: **Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico**. Rio de Janeiro, 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 18: **Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo**. Rio de Janeiro, 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: **Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2001

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30: **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 43: **Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 46: **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 51: **Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles"**. Rio de Janeiro, 2001

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 65: **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro, 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 76: **Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)**. Rio de Janeiro, 1998

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: **“Agregados – Determinação da composição granulométrica”**, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-ISO 3310-1: **“Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação - Parte 1:Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico”**, Rio de Janeiro, 1997

ASSUNÇÃO, J. W. **Curvas de Dosagem para Concretos Convencionais e Aditivados Confeccionados com Materiais da Região Noroeste do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002, 254p.

BAUER, L.A. FALCÃO – **Materiais de Construção Civil. 5ª edição**. Rio de Janeiro, Ed.: LTC, 1995. ISBN.: 978-85-21612-49-0;

BARBOSA, Carina Gabriela de Melo et al. **Avaliação da influência do nacl em pastas de cimento portland para cimentação de poços de petróleo em zonas**

**evaporíticas**. 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

BERNUCCI, LIEDI BARIANI...[et al.]. P338 **Pavimentação asfáltica : formação básica para engenheiros** / Rio de Janeiro : PETROBRAS: ABEDA, 2006. 504 f. : il.

BETIOLI, A. M. **Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland**. 2007. 188p. 2007. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BUEST NETO, G. T. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland**. 2006.

BUTTON, J.W., AND D. PERDOMO. **Identifying and Correcting Rut-Susceptible Asphalt Mixtures**. Technical Report FHWA/TX-91/1121-2F. Texas Transportation Institute, 1991.

CABANAS, Carla Sofia Santos, **Metodologia para a qualificação das misturas ligantes de acordo com a especificação**. LN EC E464-2005. 2011. Dissertação de Mestrado, Coimbra.

CABRAL, G.L.L. **Metodologia de produção e emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação**. Rio de Janeiro, 2005. 358 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

CARNEIRO, ARNALDO MANOEL PEREIRA., **Dosagem de Argamassas através de curvas granulométricas** / A.M.P. Carneiro, M.A. Cincotto. – São Paulo: EPUSP, 1999. 14 p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/237)

CENTURIONE, SÉRGIO LUIZ. ***Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland***. Diss. Universidade de São Paulo, 1993.

CHOTOLI, Fabiano Ferreira. **Obtenção de clínquer de cimento a partir de escória de aciaria a oxigênio: estudo em escala laboratorial**. São Paulo, 2006. 170p. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia em Construção de Edifícios.

COELHO, SÓNIA ALEXANDRA GUERREIRO BÁIA PESSOA. **Estudo das propriedades dos adjuvantes na compatibilidade/robustez cimento/adjuvante**. 2012. Tese de Doutorado.

COUTO, Carmen et al. **INFLUÊNCIA DA POZOLANICIDADE DA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS E CONCRETOS DURÁVEIS**. *CONSTRUINDO*, v. 2, n. 01, 2010.

CUCHIERATO, Gláucia. **Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da Região metropolitana de São Paulo (RmsP), visando seu aproveitamento econômico**. 2000. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DAMO, GABRIELA FERREIRA. **Avaliação do desempenho de diferentes agregados miúdos de britagem em concretos de cimento portland** [dissertação] / Gabriela Ferreira Damo ; orientador, Luiz Roberto Prudêncio Junior. - Florianópolis, SC, 2011. 230 p.: il., grafs., tabs.

DEWAR, J.D. AND ANDERSON, R., **Manual of Ready-Mixed Concrete**, Blackie Academic and Professional, 2nd ed., 1992, London.

DUARTE, JOÃO BATISTA. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por pó de pedra em concreto de cimento Portland** / João Batista Duarte - Natal, 2013. 86 f.: il.

EDMEADES, R. M. AND HEWLETT, P. C. Cement Admixtures. In **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**-Peter C. Hewlett, Ed. Arnold, London, 1998. ISBN: 978-0-7506-6256-7

FENNIS, S. A. A. M., AND JOOST C. WALRAVEN. "**Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design.**" *Heron* 57.2 (2012): 73-101.

FERNANDES, C.G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação.** 2004. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pósgraduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

FONSECA, FÁBIO BRAGA DA. **Desempenho estrutural de paredes de alvenaria de blocos de concreto de agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição.** Diss. Universidade de São Paulo, 2002.

FONSECA, GC da. **Adições minerais e disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica.** 2010. Tese de Doutorado. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais.

GIAMMUSSO, SALVADOR E., **Manual do concreto.** São Paulo: PINI, 1992, ISBN.: 978-85-72660-06-8;

GLÁUCIA CUCHIERATO. Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da região metropolitana de São Paulo (RMSP), visando seu aproveitamento econômico. 2000. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo (USP). Instituto de Geociências São Paulo.

GOBBO, Luciano de Andrade. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld.** 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GONÇALVES, Jardel Pereira. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial.** 2005. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

Gonçalves, J. P., et al. "**Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars.**" *Cement and Concrete Research* 37.6 (2007): 924-932.

GUIMARÃES, A. T. C. **Propriedades do concreto fresco.** In: ISAÍIA, G.C. (Ed.). *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.* São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. 1600p.

HELENE, Paulo & ANDRADE, Tibério. **Concreto de Cimento Portland.** Capítulo 29. In: ISAIA, Geraldo (Ed.). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.* 2 ed. IBRACON, 2010. v.1 & v.2. p. 945-984 ISBN 978-85-98576-14-5 e 978-85-98576-15-2

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto.** Ed.: PINI. 1993. ISBN.: 85-7266-007-0. Português, p.349

IBGE

<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=330555&search=|infogr%E1ficos:-informa%E7%F5es-completas>

JENNINGS, H. M. Design of high strength cement based materials: Part 2 - microstructure. **Materials Science and Technology**, v. 4, n. 4, p. 285-290, 1988.

JOHN, D. A.; POOLE, A. B.; SIMS, I. **Concrete Petrography: A handbook of investigative techniques.** London: Arnold, 1998. 83-185 p.

KANDHAL, P. S., J. B. MOTTER, AND M. A. KHATRI. "**Evaluation of Particle Shape and Texture: Manufactured Versus Natural Sands.**" In *Transportation Research Record 1301*, TRB, National Research Council, Washington D.C., 1991, pp. 48-56.

KELES, Karen Costa. **Influência da basicidade da escória de alto forno como adição ao concreto.** 2011.

KWAN, A. K. H., AND C. F. MORA. "**Effects of various, shape parameters on packing of aggregate particles.**" *Magazine of concrete Research* (2002).

LODI, Vitor Hugo. **Viabilidade Técnica e Econômica do Uso de Areia de Britagem em Concretos de Cimento Portland na Região de Chapecó-SC.** 2006. 2006. Tese

de Doutorado. Dissertação–Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

MARINGOLO, V. **Clínquer co-processado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento**. São Paulo: USP, 2001. 174p. Tese (Doutorado em Mineralogia), Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MARTINS, PAULO BENJAMIM MORAIS. **INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA AGREGADO MIÚDO NA TRABALHABILIDADE DO CONCRETO**. 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Feira de Santana

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais – 3ª edição**. São Paulo Ed.:IBRACON 2008. ISBN.: 978-85-98576-12-1;

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Estrutura, Propriedades e Materiais – 1ª edição**. São Paulo Ed.:PINI. 1994. ISBN.: 85-7266-040-2.

MELO, FELLIPE CÉSAR ANDRADE COSTA. **Análise de argamassas com substituição parcial do Cimento portland por cinza residual de lenha de Algaroba**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MENOSSE, RÔMULO TADEU. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. 2004. vi, 97 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2004.

MORAES, REGIS DA COSTA. **Efeitos físicos e pozolânicos das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto**. 2001. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto, – 2ª edição**. São Paulo Ed.:PINI 1997.

ISBN.: 85-7266-068-2.

NEVILLE, ADAM M. **Propriedades do Concreto-5ª Edição**. Bookman Editora, 2015. ISBN.: 9788582603659

NIEBEL, PAULO ROBERTO. **Avaliação do desempenho no estado fresco de argamassas com agregados miúdos britados utilizando curvas granulométricas parabólicas.** / Paulo Roberto Niebel – Curitiba, 2008.

PETRUCCI, ELADIO G R. **Concreto de Cimento Portland, – 13ª ed.** rev. por Vladimir Antonio Paulon - São Paulo: Globo, 1998. ISBN.: 85-250-0225-9.

PILAR, Ronaldo et al. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza pesada moída em pastas de cimento Portland.** 2012.

QUARCIONI, V. A., **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – estudo em pasta**, Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP, 2008.

RODOLPHO, P. M. (2007). **Comportamento do concreto no estado fresco contendo areia britada. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil**, Publicação E. DM – 011A/07 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160p

ROSÁRIO, KÁTIA ALRELHIA DO. **Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura/** Kátia Alrelhia do ; orientador , Alcebíades Negrão Macêdo. — 2013. 113 f.: il.; 31 cm

SANTOS JUNIOR, B. F. **Modificações morfológicas e estruturais de pastas de cimento aditivadas com termofixos a base de epóxi para utilização em poços de petróleo.** Diss. Dissertação de Mestrado em Física, Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2006.

SBRIGHI NETO, C. **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações.** Ed. G.C. Isaía. São Paulo: IBRACON, 2005, 2v.1600p

SHILSTONE, J. M., "The Aggregate: The Most Important Value-Adding Component in Concrete," Proceedings, Seventh Annual International Center for Aggregates Research Symposium, Austin, Texas, 1999.

SILVA, Guilherme Jorge Brigolini. **Estudo do comportamento do concreto de cimento portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato.** 2005.

SILVA, José Daniel Jales. **Avaliação da potencialidade de incorporação de um lodo de uma indústria de produtos de limpeza como adição mineral em concretos de cimento Portland.** 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SOUZA, Jailson Mathias de. **Estudo do comportamento químico durante a formação de anéis de clínquer em fábrica de cimento.** 2009.

TASHIMA, MAURO MITSUUCHI. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** 2006.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** 2.ed. London: Thomas Telford, 1997. 470p. ISBN: 0 7277 2592 0

VALVERDE, F. M. **Agregados para a construção civil: Balanço Mineral Brasileiro.** [s.n]. São Paulo: Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para a Construção, 2001.

WEIDMANN, DENIS FERNANDES. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland.** Florianópolis, 2008. 273 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Westerholm, Mikael, et al. "Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars." *Cement and Concrete Composites* 30.4 (2008): 274-282.