

Análise de Resistência de Concreto de Alto Desempenho

Gabriel Lopes Insaurreaga¹
Celso Luis da Silva Pedreira²
Jorge Luiz Oleinik Nunes³
Alessandra Buss Tessaro⁴
Jorge Luiz Saes Bandeira⁵
Flávia Costa de Mattos⁶

Resumo

O concreto de alto desempenho surge com objetivo de aumentar a eficiência, resistência, durabilidade e facilidade de execução dos tradicionais concretos convencionais, elevando a competitividade de um sistema construtivo que estava se tornando obsoleto frente aos concorrentes. Com isso, objetiva-se criar um concreto de alto desempenho, realizando uma caracterização dos materiais utilizados para composição da mistura, detalhando a elaboração do traço feita a partir de um método baseado no IPT, modificado pela FURG e batizado de IPT/FURG, caracterizando o concreto em suas diferentes fases. Dentre os traços executados, o mais satisfatório obteve um módulo de resistência uniaxial de compressão acima de 70 MPa com 14 dias de cura, muito acima de concretos usuais.

Palavras-chave: Concreto de Alto Desempenho; dosagem; agregados; cimento.

1 Introdução

O concreto de alto desempenho é um material simples, mas inovador e necessário para acelerar o desenvolvimento de grandes cidades em termos de eficiência de utilização, velocidade de concretagem e produção e cuidado com o impacto ambiental. O estudo e utilização de inovadoras dosagens e, por consequência, diferentes características, confere às estruturas do futuro a possibilidade da redução da utilização do concreto por conta do aumento da resistência do material, impactando diretamente no custo e durabilidade das estruturas. Para embasamento de pesquisa, investigou-se quanto ao histórico de pesquisa e utilização do material, bem como as principais utilizações do mesmo no país.

Encontradas em civilizações antigas, as misturas entre diferentes aglomerantes e agregados são facilmente encontradas em construções históricas que

resistem de forma sólida ao intemperismo causado pelo tempo. Já o concreto mundialmente conhecido nos dias atuais surgiu a partir do século XIX, sendo basicamente utilizado para fundações, pisos ou construções simples do ponto de vista estrutural. A partir da década de 1950, a revolução no emprego do concreto se iniciou alterando importantes características do material, como o ganho na resistência à compressão, viabilizando a utilização do mesmo em projetos mais complexos e a substituindo outros materiais antes largamente utilizados na construção civil. O emprego de diferentes aditivos elevou o patamar do concreto, agora chamado de concreto de alto desempenho, e o inseriu em diferentes nichos da construção, conferindo ao material durabilidade e facilidade de execução (AÍTCIN, 2000).

Geralmente caracterizado por sua alta resistência à compressão, o concreto de alto desempenho também apresenta outras características físico-químicas, como baixo volume de poros. Em termos de produção,

¹ Engenheiro Civil, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, gabriellopesinsaurreaga@gmail.com

² Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, celpedreira@uol.com.br

³ Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais, Professor da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, jorgeoleinik@gmail.com

⁴ Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais, Professora da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, alessandrabuss@gmail.com

⁵ Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais, Professor da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Jorge-band@hotmail.com

⁶ Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais, Professora da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, fcmattos@furg.br

o material se difere por ter uma baixa relação água/cimento. O material se destaca frente aos concretos convencionais por conta da possibilidade de redução na utilização do material por conta do ganho de resistência, bem como facilidade na execução e rapidez na desforma das peças por conta do ganho de resistência em idades iniciais (DINIZ, 1997).

O material tem como principais componentes de sua mistura o cimento, agregados graúdos e miúdos, aditivos e água. Para o trabalho, priorizou-se a utilização de agregados encontrados próximos ao local de estudo, sendo o aditivo doado pelo fabricante e o cimento, de nacionalidade uruguaia, obtido em uma cidade fronteira limite ao local de estudo.

2 Metodologia

Utilizaram-se dois agregados miúdos diferentes para a composição do traço, comercialmente vendidos como areia fina e areia média.

A areia média foi retirada da jazida da empresa Areal Baronesa, localizada na cidade de Capão do Leão – RS. A areia fina foi retirada da jazida da empresa Pollnow e Cia, localizada em Pelotas – RS. Para a areia comercialmente vendida como média, observou-se uma alta porcentagem do material retido acumulado (76,87%) na peneira de abertura 0,6 mm, o que o caracterizaria segundo a NBR como areia grossa. Para a areia fina, 76,87% do material acumulado foi retido na peneira de abertura 0,6mm o que o caracterizaria como areia média.

Em relação ao agregado graúdo, utilizou-se a pedra britada comercialmente vendida como Brita 1 para a composição do traço. O material foi retirado na jazida da empresa Minersul, localizada em Capão do Leão – RS. Encontrou-se uma alta porcentagem (41,91%) de material retido na peneira de abertura

12,5 mm, confrontando a classificação do agregado graúdo definida anteriormente pela norma.

Utilizou-se um cimento comercializado no Uruguai, da marca ANCAP, “Cimento Pórtland Filler 40 ANCAP” – CPF 40. O cimento é formado pelo clínquer Portland, entre 5 e 20% de calcário de alta pureza, de pequenas quantidades de gesso e aditivos.

O aditivo utilizado na produção do concreto de alto desempenho foi cedido pela empresa MC-Bauchemie, MC-PowerFlow 4001 e segundo a ficha técnica da fabricante é um aditivo superplastificante de alto desempenho, principalmente indicado para grandes reduções na quantidade de água.

Para definição da massa específica dos agregados miúdos utilizados no traço do concreto, utilizou-se o método do picnômetro pela NBR 6458 (ABNT, 2016).

Para determinação a massa específica de agregados graúdos foi determinada pela NBR 16917 (ABNT, 2021). A Tabela 1 resume as massas específicas dos agregados.

Tabela 1 – Resultados massa específica dos agregados.

Agregado	Massa específica (g/cm ³)
Areia média	2,63
Areia fina	2,61
Brita	2,63

A massa unitária dos agregados miúdos foi determinada segundo a norma NBR 7810 (ABNT, 1983), massa unitária é a massa de uma unidade de volume aparente do agregado, ou seja, o volume formado pelos grãos e vazios do mesmo. A norma para determinação da massa unitária do agregado graúdo foi a NBR NM 45 (ABNT, 2006). A Tabela 2 resume as massas unitárias dos agregados.

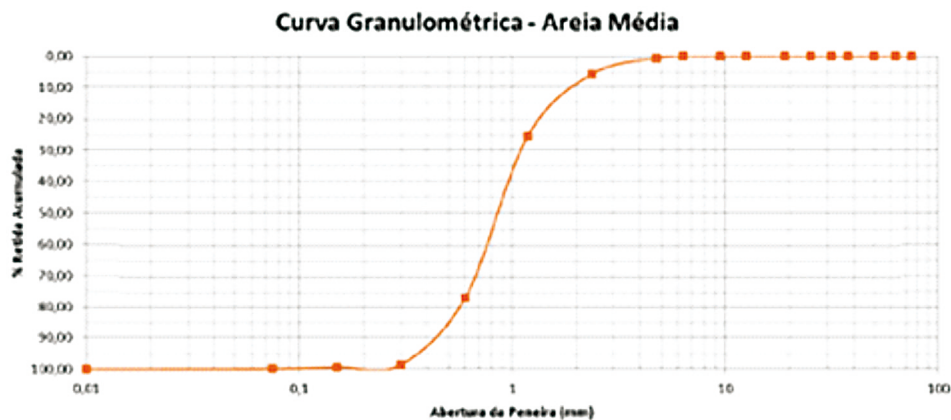


Figura 1 – Curva granulométrica areia média

Tabela 2 – Resultados massa unitária dos agregados.

Agregado	Massa específica (g/cm ³)
Areia média	1,46
Areia fina	1,38
Brita	1,38

A determinação da composição granulométrica foi pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). A Figura 1 apresenta os resultados do ensaio de composição granulométrica da areia média utilizada na composição do traço a ser definido. O diâmetro máximo característico é igual a 4,75 mm. O módulo de finura é 3,07.

A Figura 2 apresenta os resultados do ensaio de composição granulométrica da areia fina utilizada na composição do traço a ser definido. O diâmetro máximo característico é igual a 2,36 mm. O módulo de finura é 1,96.

A Figura 3 apresenta os resultados do ensaio de composição granulométrica da brita utilizada na composição do traço a ser definido. O diâmetro máximo característico é igual a 19 mm. O módulo de finura é 6,72.

O método utilizado para a definição do traço de concreto confeccionado é o IPT/FURG. Por meio dele, determinam-se três traços com diferentes quantidades de insumos a serem testados quanto à resistência a

compressão nos períodos pré-determinados de 3, 7, 14 e 28 dias. A metodologia utilizada para definição do traço é descrita a seguir:

- 1) determina-se a proporção entre cimento e agregados secos totais, em massa, chamada de 1:m. (cimento: agregados secos totais, em massa).
- 2) determina-se a quantidade de água H;
- 3) determina-se a relação água/cimento;
- 4) determina-se o percentual de cimento;
- 5) traça-se a curva de Bolomey;
- 6) com a curva granulométrica dos agregados e a curva de Bolomey, delimitam-se linhas nos gráficos a fim de definir as porcentagens dos agregados no concreto.

Os corpos de prova foram moldados segundo a NBR 5738 (ABNT, 2015). Após moldados, os corpos de prova foram identificados e passaram 24 horas em uma câmara úmida, antes de irem para um tanque de água, onde permaneceram até o dia do ensaio de resistência a compressão.

O ensaio para determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone realizado é regido pela NBR 16889 (ABNT, 2020).

O ensaio determina a resistência a compressão é amparado pela NBR 7215 (ABNT, 2019).

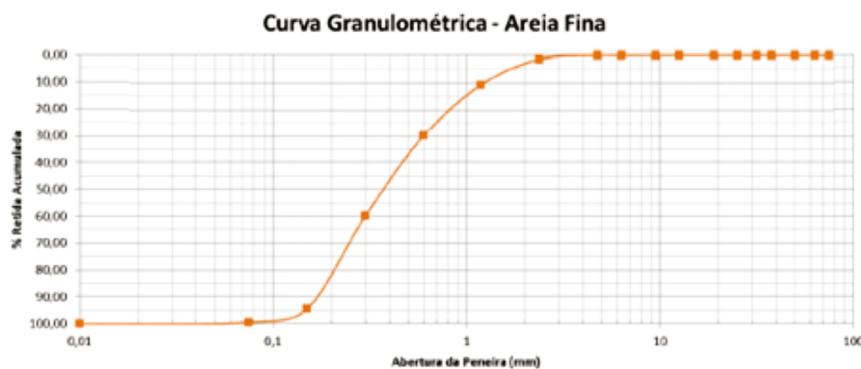


Figura 2 – Curva granulométrica areia fina.

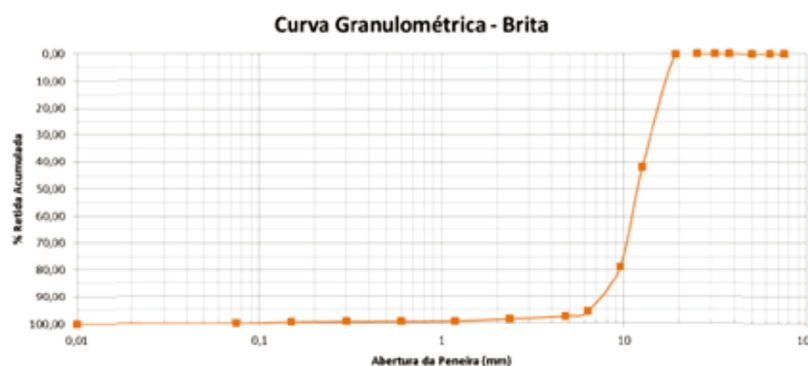


Figura 3 – Curva granulométrica brita.

3 Resultados

Três traços diferentes foram testados, com diferentes proporções entre aglomerante (cimento) e agregados (areias e brita), chamados de 1:m. As três diferentes proporções são demonstradas na tabela 3.

Tabela 3 – Traços

Traço	Proporção de cimento	Proporção de agregados (m)
1	1	5
2	1	3,5
3	1	2,3

Definidas as proporções entre cimentos e agregados e o valor de $H=8$. Definiu-se a relação água cimento através da Figura 4.

$$X_1 = \frac{H}{100} x(1+m) = \frac{8}{100} x(1+5) = 0,48$$

$$X_2 = \frac{H}{100} x(1+m) = \frac{8}{100} x(1+3,5) = 0,36$$

$$X_3 = \frac{H}{100} x(1+m) = \frac{8}{100} x(1+2,3) = 0,264$$

Figura 4 – Relação a/c do concreto.

Logo após define-se o percentual de cimento, mostrado na Figura 5.

$$P_{c1} = \frac{1}{(1+m)} = \frac{1}{(1+5)} = 16,67\%$$

$$P_{c2} = \frac{1}{(1+m)} = \frac{1}{(1+3,5)} = 22,22\%$$

$$P_{c3} = \frac{1}{(1+m)} = \frac{1}{(1+2,3)} = 30,30\%$$

Figura 5 – Percentual de cimento.

Conhecidos os valores de $A=14$, os diferentes diâmetros “d” que compõem a granulometria do agregado graúdo e o diâmetro máximo $D=19\text{mm}$,

pode-se determinar em gráfico a curva de Bolomey, associada com as curvas granulométricas dos três diferentes agregados presentes na mistura.

Definidas as porcentagens de brita (35%) e areia média (30%) comuns para todos os traços, juntamente com as porcentagens de cimento para os diferentes traços, determinou-se a porcentagem de areia fina:

$$\% \text{Areia Fina} = 100\% - \% \text{Areia Média} - \% \text{Brita} - \% \text{Cimento}$$

$$\% \text{Areia Fina Traço 1} = 100\% - 30\% - 35\% - 16,67\% = 18,33\%$$

$$\% \text{Areia Fina Traço 2} = 100\% - 30\% - 35\% - 22,22\% = 12,78\%$$

$$\% \text{Areia Fina Traço 3} = 100\% - 30\% - 35\% - 30,30\% = 4,70\%$$

Assim, os diferentes traços ficaram conforme Tabela 4.

Em termos proporcionais para unidades de cimento, dividiu-se a porcentagem dos agregados pela porcentagem de cimento da mistura, obtendo as informações da Tabela 5.

Com os traços definidos, calculou-se a quantidade de concreto a ser produzida, de forma a ser suficiente para confecção dos corpos de prova e para o ensaio de abatimento de tronco de cone. Foram previstos três “betonadas”. Nesta etapa também se adicionou o aditivo à mistura. Inicialmente, a quantidade arbitrada de aditivo é definida em 1% da massa de cimento utilizada. A quantidade de insumos, necessária para os experimentos é descrita na tabela 6.

Para a execução dos traços, houve algumas considerações:

Acrescentou-se 2% de massa nos agregados miúdos por conta da umidade natural em que os materiais se encontravam;

Não se colocou a totalidade de água previamente determinada por conta da utilização de um aditivo superplastificante na confecção do concreto;

Acrescentou-se 22 gramas de aditivo no traço 1 e 20 gramas de aditivo nos traços 2 e 3 na hora da concretagem

Conforme detalhado anteriormente, a relação água/cimento foi modificada visando reduzi-la o máximo possível, por conta da utilização de um aditivo

Tabela 4 – Porcentagens de cimento e agregados para os diferentes traços.

Traço	Cimento (%)	Areia Média (%)	Areia fina (%)	Traço	Cimento (%)	Areia Média (%)	Areia fina (%)	Brita (%)
1	16,67	30	18,33	1	16,67	30	18,33	35
2	22,22	30	12,78	2	22,22	30	12,78	35
3	30,3	30	4,7	3	30,3	30	4,7	35

superplastificante e do vínculo que a relação água/cimento tem com a resistência final à compressão do concreto. Na Tabela 7, constam as quantidades de água previamente determinadas para os traços e as de fato utilizadas, juntamente com as relações água/cimento previamente determinadas e as novas definidas.

Determinados os parâmetros e confeccionados os concretos, os resultados obtidos no ensaio do abatimento de tronco de cone estão descritos na Tabela 8.

Observa-se um abatimento muito maior nos traços 2 e 3. Nos traços com proporções 1:m, quando o valor de “m” se reduz, a proporção de agregados na mistura se torna menor e, por consequência, a porcentagem de cimento é maior.

Para o ensaio de resistência a compressão os corpos de prova foram retificados de forma a nivelar sua superfície para regularizar a distribuição de tensões.

A Tabela 9 mostra a resistência a compressão aos 3 dias.

A Tabela 10 mostra a resistência a compressão aos 7 dias.

A Tabela 11 mostra a resistência a compressão aos 14 dias.

Por último, realizou-se uma análise gráfica relacionando a tensão normal de ruptura para compressão dos três diferentes traços de corpos de prova e o fator água cimento de cada um. A curva de Abrams está representado na Figura 7 e os dados necessários para sua construção se encontram na Tabela 12.

4 Considerações Finais

Na comparação entre os traços, o traço de

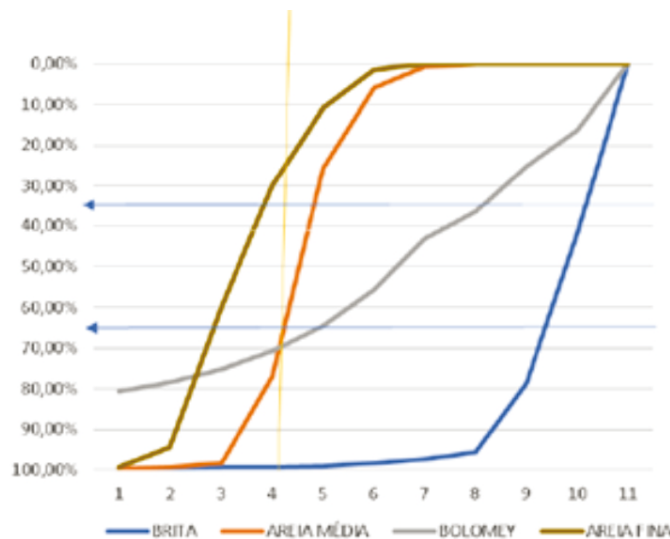


Figura 6 – Curva de Bolomey com a granulometria dos agregados.

Tabela 5 – Traços detalhados.

Traço	m	Cimento	Areia média	Areia fina	Brita	a/c
1	5	1	1,8	1,1	2,1	0,48
2	3,5	1	1,35	5,8	1,58	0,36
3	2,3	1	0,99	0,16	1,56	0,3

Tabela 6 – Insumos necessários para a concretagem dos corpos de prova.

Traço	Cimento (kg)	Areia média (kg)	Areia fina (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Aditivo (g)
1	8	14,4	8,8	16,8	3,84	80
2	10	13,5	5,75	15,75	3,6	100
3	10	9,9	1,55	11,55	3,03	100

número 3 e $m=2,3$ cumpriram com as expectativas de apresentar a maior resistência entre os três traços definidos. A maior proporção entre aditivo e volume de concreto, a menor relação água/cimento e a menor relação entre massa de cimento e agregados são os principais motivos que apontam a maior resistência à compressão.

Comparando os traços, percebe-se uma grande discrepância nos valores finais de resistência. O traço 2 apresenta em relação ao traço 1 em 3 dias uma resistência à compressão 247% maior, aos 7 dias uma resistência 206% maior e aos 14 dias uma resistência 194% maior. Já o traço 3 apresenta em relação ao traço 2 uma resistência à compressão 45% maior aos 3 dias, 61% maior aos 7 dias e 28% maior aos 14 dias.

Em relação aos ganhos de resistência, o traço 1 com 7 dias de cura apresentou um ganho de resistência de 104% em relação aos resultados com 3 dias, e nos 14 dias de cura aproximadamente 60% de ganho em relação aos 7 dias. O traço 2 com 7 dias de cura apresentou um ganho de resistência de 80% em relação aos resultados com 3 dias, e nos 14 dias um ganho de 53% em relação aos 7 dias. O traço 3 apresentou com 7 dias um ganho de resistência de 100% em relação aos dados medidos aos 3 dias, e apenas 22% se comparando os 14 dias com o dado anterior.

Por fim, acredita-se que o agregado graúdo tenha sido misturado entre diferentes rochas de origem por conta de sua grande variabilidade de cor, colocando em dúvida a resistência do material em altas pressões.

Tabela 7 – Novas relações a/c.

Traço	m	Massa de cimento utilizada (kg)	Massa de água inicial (kg)	Relação a/c original	Massa de água (kg)	Nova relação a/c
1	5	8	3,84	0,48	3,618	0,452
2	3,5	10	3,6	0,36	3,066	0,307
3	2,3	10	3,03	0,303	2,178	0,218

Tabela 8 – Resultados abatimento tronco de cone.

Traço	m	Aditivo utilizado	Abatimento (mm)
1	5	102	75
2	3,5	120	220
3	2,3	120	260

Tabela 9 – Resistência a compressão aos 3 dias.

Traço	m	Força ruptura (ton)		Resistência a compressão (Mpa)
		CP1	CP2	
1	5	4,57	4,57	5,71
2	3,5	15,86	15,89	19,86
3	2,3	23,09	23,09	28,86

Tabela 10 - Resistência a compressão aos 7 dias.

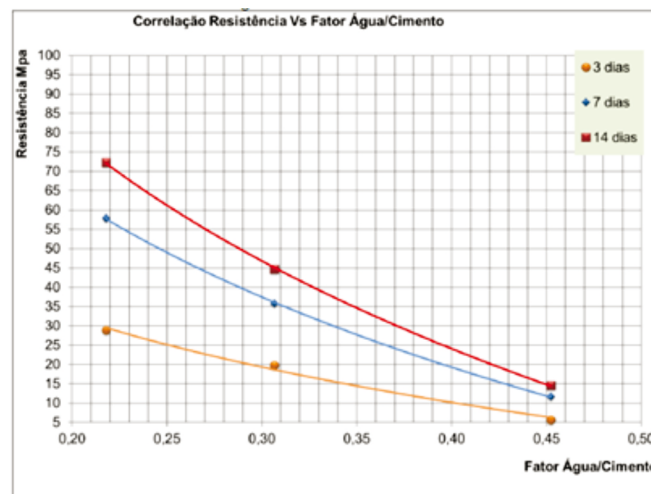
Traço	m	Força ruptura (ton)		Resistência a compressão (Mpa)
		CP1	CP2	
1	5	9,34	9,34	11,67
2	3,5	27,48	28,6	35,74
3	2,3	46,29	46,29	57,85

Tabela 11 – Resistência a compressão aos 14 dias.

Traço	m	Força ruptura (ton)		Resistencia a compressão (Mpa)
		CP1	CP2	
1	5	14,91	14,91	18,63
2	3,5	43,78	43,97	54,95
3	2,3	56,67	56,67	70,82

Tabela 12 – Dados necessários para a construção da curva de Abrams

Traço	a/c	Resistência a compressão (Mpa)		
		3 dias	7 dias	14 dias
1	0,45	5,7	11,7	14,58
2	0,31	19,9	35,7	44,66
3	0,22	28,9	57,9	72,29



5 Referencias

AİTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo: Editora Pini, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768: Aditivos Químicos para Concreto de Cimento Portland**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16689: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e Solos**. Rio de Janeiro, 1995.

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

Figura 7 – Curva de Abrams

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7225: Materiais e Agregados Naturais.** Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7810: Agregado em estado compactado seco – Determinação da massa Unitária.** Rio de Janeiro, 1983.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33: Concreto – Amostragem de concreto fresco.** Rio de Janeiro, 1998.

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 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM-ISO 3310-1:97 – Peneiras de Ensaio – Requisitos Técnicos e Verificação.** Rio de Janeiro, 1997.

DINIZ, J. Z.; WESPER, M. W. AMARAL FILHO, E. M. **Concreto de alto desempenho.** São Paulo: IBRACON, ABCP, ITBTS, ABESC. 1997.