

Análise comparativa de resistência à compressão axial do concreto utilizando quatro tipos de cimento Portland

Caio Henrique Nunes
Matheus Augusto Gomes Barbosa
Matheus Maggi Waltrick
Mônica Rodrigues Weber
Thaís Hitomi Canetomi

Análise comparativa de resistência à compressão axial do concreto utilizando quatro tipos de cimento Portland

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil
Orientador: Prof. Dr. André Luís Gamino
Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium
UniSALESIANO - Araçatuba

NUNES, Caio – 1992
BARBOSA, Matheus – 1995
WALTRICK, Matheus – 1995
WEBER, Mônica – 1985
CANETOMI, Thaís – 1995

Análise comparativa de resistência à compressão axial do concreto utilizando quatro tipos de cimento Portland
63 p. – Trabalho de Conclusão de Curso

UniSALESIANO – Centro Universitário Católico Auxilium

1. Cimento Portland. 2. Composição do cimento. 3. Resistência à compressão. 4. Tipos de cimento.

**Análise comparativa de resistência à compressão axial do concreto utilizando
quatro tipos de cimento Portland**

**Acadêmicos(as): Caio Henrique Nunes
Matheus Augusto Gomes Barbosa
Matheus Maggi Waltrick
Mônica Rodrigues Weber
Thaís Hitomi Canetomi**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil
Orientador: Prof. Dr. André Luís Gamino
Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium
UniSALESIANO – Araçatuba

Prof. Dr. André Luís Gamino
Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium – UniSALESIANO
Data: 29 / 11 / 2017

Prof. Ma. Ágatha Stela de Moraes
Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium – UniSALESIANO
Data: 29 / 11 / 2017

Prof. Cleverson Arenhart
Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium – UniSALESIANO
Data: 29 / 11 / 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois sem ele não teria forças para essa longa jornada. Agradeço também a todos que não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de vida, em especial a minha mãe, irmão, padrinho e namorada que me deram todo seu cuidado, dedicação e em alguns momentos difíceis, a esperança para seguir.

Agradeço a Deus pela oportunidade, saúde e foco para concluir o curso. À minha família, pelo amor e incentivo. À empresa AMGR pelo suporte prestado. A todos que fizeram parte de minha jornada e a todos os professores que foram importantes para minha formação, em especial meu orientador, que me instruiu na elaboração deste trabalho.

Agradeço a Deus e a todos aqueles que me apoiaram durante a realização deste trabalho e também durante o curso, principalmente meus pais, irmão, meus amigos e o orientador da monografia. Também agradeço ao corpo docente e a instituição por proporcionar conhecimento acadêmico importante para minha formação.

Quero externar minha gratidão a Deus, por ter colocado pessoas ímpares no meu caminho, por ter me direcionado e, sobretudo, por ter chegado até aqui. Às minhas mães e irmãs pelo enorme carinho que ultrapassa qualquer distância e resiste ao tempo. Ao professor André Luís Gamino, cujo sentimento excede a gratidão, ampliando-se a magnitudes cujas palavras são insuficientes para expressar a enorme admiração e respeito pelo profissional-educador.

Agradeço a Deus, por estar sempre presente em minha vida, me iluminando e guiando nesta longa caminhada. Aos meus pais, avós e familiares pela criação e educação por eles concedidas que me permitiram chegar até aqui. A todos os educadores que tive a honra de ter durante toda a jornada por todo conhecimento compartilhado e a todos que de alguma forma contribuíram em minha formação pessoal, educacional e profissional.

Agradecemos também nosso professor orientador, Dr. André Luís Gamino e demais professores pela paciência, dedicação e ensinamentos que possibilitaram que realizássemos este trabalho. Ao UniSalesiano – Campus Araçatuba por ter nos dado a oportunidade de realizar este curso e TCC, disponibilizando de laboratório e materiais para a realização do mesmo. Além disso, as empresas que contribuíram para o presente trabalho de alguma forma, como AMGR Construções, Conscape Construções e Redondaço.

RESUMO

Os cimentos Portland disponíveis no mercado variam em sua composição química e física, e conseqüentemente nas propriedades reológicas do concreto. Neste trabalho foi analisada a resistência à compressão axial de corpos de prova cilíndricos de concreto, tendo em comum o traço para f_{ck} 30 MPa desenvolvido pelo método INT, utilizando como aglomerante, quatro tipos distintos de cimento Portland, sendo estes CP II-F-32, CP II-Z-32, CP IV-32-RS e CP V-ARI. Para cada tipo de concreto foram moldados dez corpos de prova, que foram rompidos com idades de 3, 7, 14, 28 e 105 dias. Com os resultados obtidos foi possível identificar a variação de resistência à compressão axial que o concreto com determinadas idades apresenta, a consistência do concreto fresco por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone e as classes de resistência de cada um deles. De acordo com a composição dos cimentos empregados estimavam-se comportamentos peculiares para cada tipo estudado, que foram confirmados conforme segue os resultados dos concretos: maior resistência inicial à compressão e maior valor absoluto final para o cimento CP V-ARI; por ter mais adições em sua composição, o concreto com o cimento CP IV-32-RS apresentou menor resistência inicial à compressão, porém maior percentual de ganho entre 3 e 105 dias; com os cimentos CP II-F-32 e CP II-Z-32 obtiveram-se resistências intermediárias quando comparados aos demais, no entanto, se comparado entre os dois, aquele com o CP II-F-32 foi ligeiramente mais resistente à compressão. Foi possível evidenciar também que embora tenham sido calculados com mesmo traço, as classes de resistência variaram entre C35 e C50. Os resultados mostraram a importância da escolha do cimento adequado frente à resistência de projeto e desmistificaram a ideia de que na composição do concreto qualquer cimento é apropriado.

Palavras-chave: Cimento Portland; Composição do cimento; Resistência à compressão; Tipos de cimento.

ABSTRACT

The Portland cements available in the market vary in their chemical and physical composition, and consequently in the rheological properties of the concrete. In this study the axial compression strength of cylindrical specimens of concrete was analyzed, having in common the concrete mix for f_{ck} 30 MPa developed by the INT method, using as binder four different Brazilian types of Portland cement, being these CP II-F-32, CP II-Z-32, CP IV-32-RS and CP V-ARI. For each type of concrete, ten specimens were molded, which were ruptured at ages of 3, 7, 14, 28 and 105 days. With the results obtained it was possible to identify the variation of axial compressive strength that the concrete with certain age presents, the consistency of fresh concrete through slump test and the resistance classes of each one of them. According to the composition of the cements used, it was estimated peculiar behaviors to each type studied, which was confirmed according to the concrete results: higher initial compressive strength and higher ultimate value for CP V-ARI cement; by having more additions in its composition, the concrete with CP IV-32-RS cement showed lower initial compressive strength, but a higher gain percentage, between 3 and 105 days; with CP II-F-32 and CP II-Z-32 cements, intermediate compressive strengths were obtained when compared to the others, however, when compared to each other, CP II-F-32 was slightly more resistant. It was also possible to evidence that although they were calculated with same concrete mix, the resistance classes varied between C35 and C50. The results showed the importance of choosing the correct cement considering the characteristic strength and demystified the idea that in the concrete composition any cement is suitable.

Keywords: Portland cement; Cement composition; Compressive strength; Types of cement.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS	10
3. JUSTIFICATIVA	11
4. ESTADO DA ARTE	12
4.1 Origem do Cimento.....	12
4.2 Composição e Tipos.....	14
4.3 Revisão Bibliográfica.....	20
5. MATERIAIS E MÉTODOS	28
5.1 Traço	28
5.2 Ensaio Granulométrico	29
5.3 Moldagem dos Corpos de Prova e Abatimento do Tronco de Cone (<i>Slump Test</i>).....	31
5.4 Ensaio de Compressão Axial	35
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
7. CONCLUSÕES.....	59
7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	60
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1. INTRODUÇÃO

Para analisar a resistência mecânica do concreto, é necessário, primeiramente, conhecer os componentes deste material, que é o segundo elemento mais usado no mundo, atrás somente da água (SNIC, 2017). O concreto é composto de agregados, água e aglomerante. O principal aglomerante no ramo da construção civil é o cimento Portland, nome convencionado mundialmente para representar o popular cimento. Ele é um material fino e em pó com propriedade aglutinante que se solidifica com a presença de água, e mesmo que umedecido posteriormente, permanece indissolúvel.

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o cimento é composto de clínquer e adições, sendo o clínquer seu principal elemento, presente em todas as qualidades de cimento. As adições são as responsáveis por definir o tipo do cimento e suas individualidades. Sua acrografia corresponde ao prefixo CP seguido de algarismos romanos, variando de I a V. Em relação às suas propriedades, como resistência à compressão, permeabilidade e resistência a meios agressivos, cada tipo de cimento age de forma distinta na argamassa ou concreto produzido. Desta maneira, e conforme a classe de agressividade ambiental, deve-se levar em consideração o tipo de cimento selecionado na dosagem do concreto ou argamassa, buscando empregar o mais adequado para cada situação, evitando patologias futuras.

Muitos construtores estão conscientes que há vários tipos de cimento no mercado, porém na compra do material, ignoram esse fato e adquirem qualquer um dos tipos disponíveis, muitas vezes o mais econômico, sem realizar uma análise das características que o produto obtido irá apresentar quando transformado em concreto. Caso não seja utilizado o cimento adequado, os resultados podem não sair como esperado, por exemplo, quando há necessidade de um concreto para desforma rápida, o mais recomendável é o CP V, por ter alto ganho de resistência inicial, ou ainda, se for preciso um baixo calor de hidratação inicial do concreto, é aconselhável o uso do CP IV, que é indicado para construções de grandes estruturas, como barragens e vertedouros por evitar a fissuração por retração. Mas se o construtor conhece o tipo de cimento e ainda assim por motivos de indisponibilidade ou inviabilidade não faz a aquisição do tipo indicado, podem ser realizadas adaptações no processo de produção para que o produto final tenha as características desejadas.

O concreto adquirido em centrais de dosagem faz-se necessário realização do controle tecnológico com vista a averiguar se o concreto obtido e desenvolvido para determinado traço apresenta as características para o qual fora elaborado, assim como identificar a presença de demais problemas. O teste realizado para constatar as características desejáveis do concreto em relação à resistência à compressão axial não é instantâneo, uma vez que após moldados os corpos de prova (CPs) deste material, é necessário aguardar um período de 28 dias para rompê-los, comprovando a resistência do lote por meio de prensa eletrohidráulica.

Cada tipo de cimento possui uma média de resistência à compressão axial em relação a sua composição e idade, como mostrado na Figura 1. Além do clínquer e do gesso, a maioria dos cimentos possui algum tipo de adição durante sua fase de moagem, como por exemplo, pozolana, escória de alto forno e/ou calcário, que lhe atribui de acordo com a proporção do componente adicionado, características preponderantes.

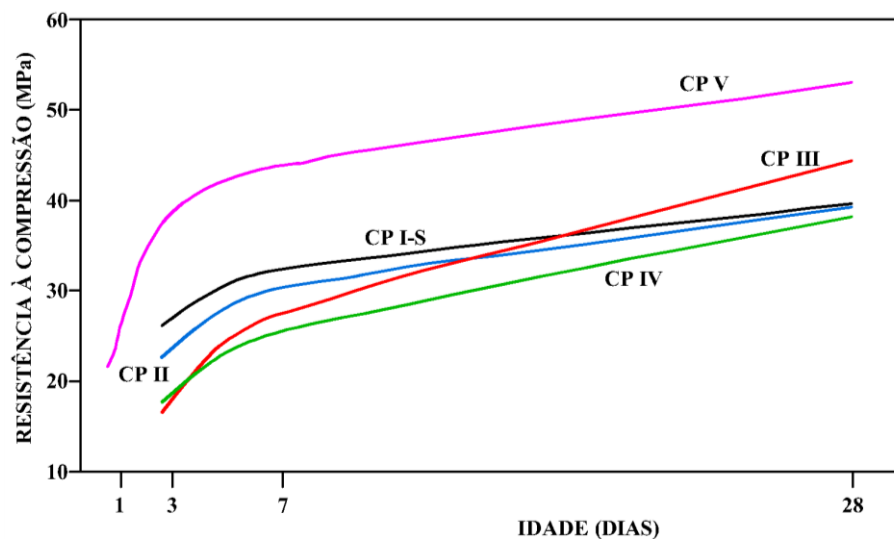


Figura 1 – Resistência média à compressão de diferentes tipos de cimento Portland modificado de ABCP (2002).

Por isso o interesse em analisar o comportamento do concreto em relação à resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de mesmo traço, utilizando quatro tipos distintos de cimento encontrados na região de Araçatuba-SP: cimento Portland composto com fíler (CP II-F-32); cimento Portland composto com pozolana (CP II-Z-32); cimento Portland pozolânico resistente a sulfatos (CP IV-32-RS); e cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI). Todos seguindo as normas específicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 11578 (1991), NBR 5736 (1991) e NBR 5733 (1991), referentes respectivamente ao tipo CP II, CP IV

e CP V, sendo ainda necessário citar a NBR 5737 (1992) que diz respeito aos cimentos Portland resistentes a sulfatos, como é o caso do CP IV utilizado neste trabalho.

Para isso foram moldados 10 corpos de prova com cada um dos tipos de cimento supracitados, realizando ensaios de compressão axial aos 3, 7, 14, 28 e 105 dias de idade, assim como teste de abatimento de tronco de cone para verificação da consistência e trabalhabilidade do concreto a fim de mostrar a importância e a influência da escolha do tipo de cimento na execução do concreto.

2. OBJETIVOS

Este trabalho visa:

- ✓ Comparar a variabilidade de resistência à compressão do concreto utilizando diferentes tipos de cimento Portland;
- ✓ Analisar a consistência do concreto fresco produzido com os quatro tipos de cimentos estudados;
- ✓ Identificar características mecânicas do concreto proveniente das adições utilizadas na composição do cimento;
- ✓ Expor as diferenças do produto final (concreto) frente ao tipo de cimento utilizado.

3. JUSTIFICATIVA

Como já mencionado, o cimento Portland é o material empregado na construção civil de maior consumo no mundo. Apesar de ser empregado há quase dois séculos, e em nosso país sua efetiva produção ter iniciado há cerca de 90 anos, muitos o utilizam aleatoriamente sem conhecimento de suas propriedades específicas.

Com vistas à preservação dos recursos naturais e a sustentabilidade, a indústria cimentícia vem utilizando resíduos industriais que antes eram descartados em lixões municipais, como adições no cimento. Essas adições ao clínquer proporcionam a redução da emissão de CO₂ devido à diminuição da queima de combustíveis e da emissão por calcinação – um tratamento térmico de sólidos que promove transformações fisioquímicas como a eliminação de substâncias voláteis – diversificando as aplicações e características específicas de cada tipo de cimento.

Este estudo justifica-se pela importância de conhecer melhor o comportamento e as características dos tipos de cimentos empregados na produção de concreto, para que aqueles que manipulam o material possam obter conhecimento amplo deste produto quanto aos seus tipos disponíveis, seu histórico, matérias-primas de composição, ganho de resistência e trabalhabilidade, visando como assunto principal evidenciar a ideia de que na composição do concreto nem todo tipo de cimento seja adequado para as mesmas finalidades.

Nas situações em que o canteiro de obra produz o concreto *in loco* com mesmo traço e cimento, ao fazer uso de outro tipo de cimento, percebe-se por aqueles que mantêm contato direto com o concreto, alterações na trabalhabilidade e tempo de secagem do mesmo. Tendo consciência das diferenças no comportamento de cada tipo de cimento, na aquisição do material, seria priorizada a finalidade para o qual ele seria utilizado.

4. ESTADO DA ARTE

4.1 ORIGEM DO CIMENTO

Embora o cimento tenha sido patenteado somente em 1824, Battagin (2017) estima que sua origem tenha sido há cerca de 4500 anos, tendo como base obras antigas da Grécia, Roma e Egito que já utilizavam uma mistura de gesso calcinado na sua composição em monumentos como o Panteão e o Coliseu.

O desenvolvimento do cimento mais próximo do que ele é atualmente começou em 1756 com o inglês John Smeaton, que elaborou um produto com alta resistência pela calcinação de calcários moles e argilosos. Dando continuidade ao trabalho de Smeaton, o francês Louis-Joseph Vicat obteve resultados parecidos em 1818. Mas foi em 1824 que o construtor inglês Joseph Aspdin realizou um processo de queima de pedras calcárias com argila, transformando-as em um pó fino que ao secar após ser umedecido, apresentava uma consistência dura e indissolúvel. No mesmo ano, o construtor patenteou esse pó com o nome de “Cimento Portland”, sendo classificado pela ABCP como o nome técnico do material popularmente conhecido como cimento. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), a palavra cimento é derivada do latim *cementu*, um tipo de pedra natural de rochedos encontrada na Roma antiga. Já a palavra Portland origina-se da ilha britânica de Portland, onde no século XIV a maioria das construções era feita com pedras desta ilha, mostrada na Figura 2, e como o cimento após ser hidratado se assemelha na cor e dureza com as pedras descritas, foi patenteado com este nome.



Figura 2 – Pedra da ilha britânica de Portland segundo a ABCP (2012).

O Brasil no final do século XIX importava cerca de 40 mil toneladas de cimento da Europa, porém com taxas de importação muito elevadas, na ordem de 30%. Isso acabou estimulando empreendedores brasileiros na criação de fábricas de cimento no país. O engenheiro Louis Nóbrega foi o primeiro a começar produzir cimento no Brasil, mas sua fábrica funcionou apenas três meses do ano de 1892. Outras duas fábricas foram abertas nos anos seguintes, porém devido à forte concorrência do produto importado e a desmoralização do produto brasileiro, orquestrado pelos importadores do cimento, também não obtiveram resultados satisfatórios. Em 1926 a importação do cimento de países como Estados Unidos, Inglaterra, França, e outros chegava a 400 mil toneladas anuais enquanto a produção local não passava da faixa de 13 mil. Foi neste ano que a indústria cimentícia tomou força, sendo inaugurada a Companhia Brasileira de Cimento Portland em Perus, distante 23 quilômetros da cidade de São Paulo naquela época, observada na Figura 3. Com a instalação da fábrica, a produção de cimento no Brasil cresceu 638% em apenas três anos, passando de 13 mil toneladas em 1926 para 96 mil em 1929, obtendo a conquista do mercado nacional e a confiança dos consumidores.

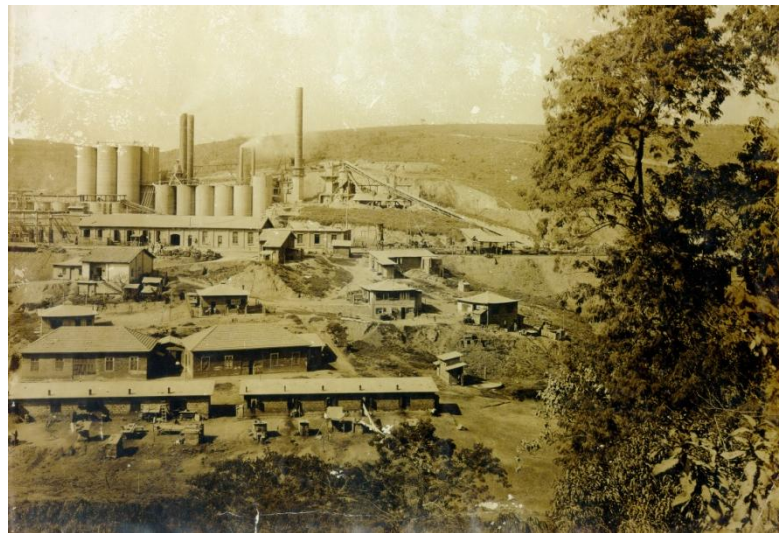


Figura 3 – Vista da Fábrica de Cimento em Perus em 1920 de acordo com Jeronymo (2016).

Em 2013, de acordo com o relatório anual do SNIC, o Brasil possuía 88 fábricas de cimento espalhadas pelo país, sendo 25 delas localizadas na região nordeste e 39 na região sudeste com um consumo per capita de cimento de 353 kg. Neste mesmo ano o país produziu quase 71 milhões de toneladas do material contra aproximadamente 35 milhões da década anterior, gerando crescimento de 103,4% em 10 anos, sendo

classificado como sexto maior produtor de cimento do mundo, ficando atrás da China, Índia, Estados Unidos, Irã e Turquia.

4.2 COMPOSIÇÃO E TIPOS

Conforme o guia básico de utilização do cimento Portland da ABCP, todos os cimentos são compostos de clínquer e adições. As adições são variáveis e são elas que definem os tipos de cimento, seja por quantidade ou pela simples presença do material adicionado.

O clínquer é resultado da calcinação da mistura de calcário e argila que submetidos à ação de elevada temperatura, chegam à fusão sob a forma de pelotas, em seguida são resfriados bruscamente, moídos e pulverizados. No processo de fusão, ocorrem combinações químicas que dão origem ao silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico e ao ferro aluminato tetracálcico, principais compostos do cimento.

- ✓ Silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$): Responsável pela resistência em todas as idades, sobretudo até o primeiro mês, é o segundo elemento mais importante na liberação de calor de hidratação e influencia no tempo de pega do cimento. No processo de endurecimento por hidratação, hidrolisa-se, decompondo em silicato bicálcico e hidróxido de cálcio (crystal da solução supersaturada de cal mostrada na Figura 4).

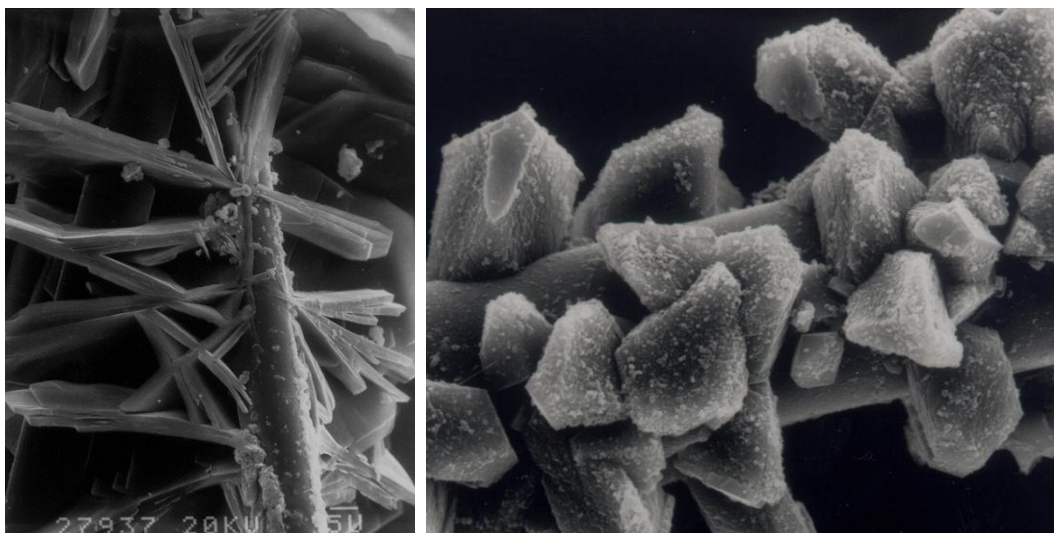


Figura 4 – Placas hexagonais de hidróxido de cálcio segundo Alizadeh (2017).

- ✓ Silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$): No processo de endurecimento em idades mais avançadas – um ano ou mais – o ganho de resistência é obtido, tendo como o componente responsável este composto. Na hidratação, resulta da hidrólise do silicato tricálcico (Figura 5) e a determinadas temperaturas (estrutura de natureza cristalina em elevadas temperaturas), deposita-se no estado de gel após adquirir duas moléculas de água.

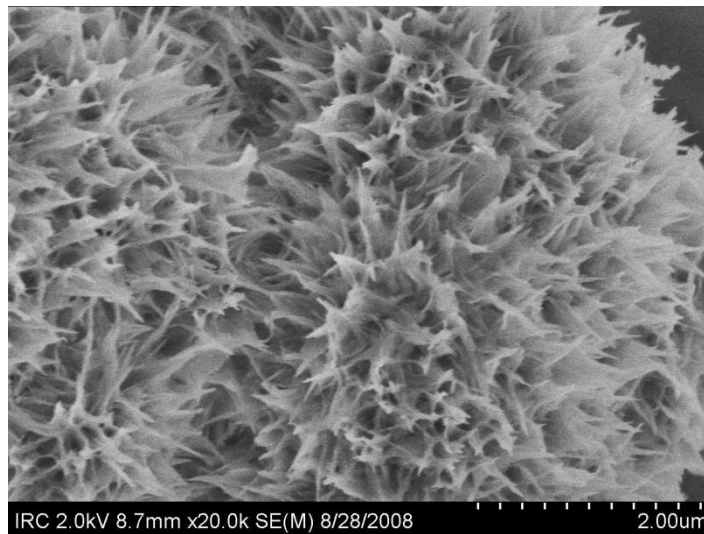


Figura 5 – Cristais de silicato de cálcio hidratado segundo Alizadeh (2017).

- ✓ Aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$): Contribui para a resistência inicial especialmente nas primeiras 24 horas, assim como para o calor de hidratação no início do período de cura, e é responsável pela rapidez da pega quando em forma cristalina. Desenvolve cristais de variado conteúdo de água quando se hidrata. O clínquer, quando hidratado, tem endurecimento imediato, tornando-se material inútil para o consumidor, daí a necessidade da correção do clínquer com adição de sulfato de cálcio hidratado natural (gipsita).
- ✓ Ferro aluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AFe}$): Não contribui para a resistência e quando hidratado assume forma gelatinosa.

O clínquer é um ligante hidráulico, sua propriedade mais importante é o ganho de elevada resistência à compressão e durabilidade quando em sua forma em pó reage com a água, formando primeiramente uma mistura pastosa e posteriormente endurecida.

As adições como o sulfato de cálcio (gesso) são acrescentadas durante a fase de moagem do clínquer, assim como escórias de alto-forno, materiais pozolânicos e/ou materiais carbonáticos (também conhecidos como fíler).

O sulfato de cálcio tem como função retardar a pega, ou seja, atrasar o início do endurecimento da reação feita pelo clínquer e a água. Ele está presente em todos os tipos de cimento, em porcentagem correspondente de 3% a 5% em massa do clínquer utilizado. Caso não fosse adicionado o gesso, o início da pega seria instantâneo, o que acabaria limitando seu uso em obras, pois a trabalhabilidade seria reduzida.

As escórias de alto-forno vêm da produção de ferro-gusa das indústrias siderúrgicas. Elas eram consideradas um material sem uso, até ser descoberto que quando granuladas tinham propriedade de ligante hidráulico, reagindo na presença de água quando ativada por meio alcalino, adquiriu resistência semelhante ao clínquer. Além disso, também apresentam outras propriedades, como maior durabilidade e alta resistência à compressão.

Os materiais pozolânicos, ou apenas pozolanas, são provenientes de rochas vulcânicas, argila queimada ou cinzas da queima de carvão mineral, também conhecidas como cinzas volantes. O acréscimo deste material moído em grãos finíssimos na reação de clínquer em pó, gesso e água resulta num composto com propriedades aglomerantes. O concreto resultante dessa mistura tem sua microestrutura modificada, aumentando a durabilidade, estabilidade, trabalhabilidade e resistência à compressão em idades avançadas; diminuindo sua permeabilidade, calor de hidratação, porosidade capilar e difusibilidade iônica (ABCP, 2012).

Denominados como fíler calcário, os materiais carbonáticos quando presentes no cimento, segundo ABCP, confere maior trabalhabilidade aos concretos e argamassas, devido ao fato das partículas desses materiais moídos terem dimensões adequadas para se alojar entre os grãos dos demais componentes do cimento, contribuindo para a resistência inicial à compressão do concreto.

No Brasil, os tipos de cimentos são classificados de acordo com normas da ABNT. Nelas estão presentes as características e propriedades mínimas que as fábricas brasileiras de cimento devem atender, além do método de ensaio para verificação da resistência à compressão dos cimentos. A qualidade do cimento é aferida pela ABCP e as fábricas que estiverem de acordo com os requisitos de qualidade desta associação terão estampados na embalagem do cimento o Selo de Qualidade ABCP, exemplificado na Figura 6.



Figura 6 – Selo de qualidade estampados em sacos de cimento de empresas certificadas pela ABCP (2012).

Os tipos encontrados são:

- ✓ CP I – Cimento Portland comum
 - CP I – Cimento Portland comum
 - CP I-S – Cimento Portland comum com adição
- ✓ CP II – Cimento Portland composto
 - CP II-E – Cimento Portland composto com escória
 - CP II-F – Cimento Portland composto com fíler
 - CP II-Z – Cimento Portland composto com pozolana
- ✓ CP III – Cimento Portland de alto-forno
- ✓ CP IV – Cimento Portland pozolânico
- ✓ CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial
- ✓ CPB – Cimento Portland branco
 - Cimento Portland branco estrutural
 - Cimento Portland branco não estrutural
- ✓ Cimento Portland resistente a sulfatos (RS)
- ✓ Cimento Portland de baixo calor de hidratação (BC)

Todos os tipos de cimento, com exceção do CP V-ARI e do cimento Portland branco não estrutural, apresentam as seguintes classes de resistência à compressão: 25 MPa, 32 MPa ou 40 MPa. Segundo esta classificação, a argamassa de cimento endurecido após 28 dias devem apresentar a resistência superior à sua classe, enquanto

os demais possuem classe única. Embora em normas da ABNT ainda conste a classe 25, ela não está mais no mercado há mais de duas décadas segundo a ABCP.

Como já mencionado, cada tipo de cimento tem uma composição diferente, apesar de na maioria das vezes utilizarem os mesmos componentes, a sua porcentagem em massa é alterada, conforme Tabela 1, mostrando a composição dos principais tipos de cimento e a norma da ABNT que o regulamenta.

Tabela 1 – Composição do cimento Portland de acordo com as normas da ABNT segundo ABCP (2012).

Cimento Portland (ABNT)	Clínquer + Gesso (%)	Escória de Alto-Forno (%)	Material Pozolânico (%)	Material Carbonático (%)	Norma Técnica (ABNT)
CP I	100	-	-	-	NBR 5732 (1991)
CP I-S	95-100	0-5			
CP II-E	56-94	6-34	-	0-10	NBR 11578 (1991)
CP II-F	90-94	-	-	6-10	
CP II-Z	76-94	-	6-14	0-10	
CP III	25-65	35-70	-	0-5	NBR 5735 (1991)
CP IV	45-85	-	15-50	0-5	NBR 5736 (1991)
CP V-ARI	95-100	-	-	0-5	NBR 5733 (1991)
CPB estrutural	75-100	-	-	0-25	NBR 12989 (1993)
CPB não estrutural	50-74	-	-	26-50	

Os cimentos Portland resistente a sulfatos e de baixo calor de hidratação não constam na tabela, pois as adições que lhe conferem essas propriedades são identificadas com a inserção do sufixo RS (resistente a sulfatos) ou BC (baixo calor de hidratação), como por exemplo, CP III-RS, CP IV-BC entre outros.

O CP-I foi o primeiro cimento fabricado no Brasil, ele não possui adições em sua composição, com exceção do sulfato de cálcio, enquanto o CP I-S contém uma adição de até 5% de materiais pozolânicos, carbonáticos e/ou escórias de alto-forno. Eles foram usados como parâmetro para a criação dos outros tipos. Hoje, seu uso e produção são inexpressivos quando comparado aos demais. Em 2012 conforme o SNIC, os cimentos CP I e CP I-S correspondiam a apenas 0,39% de toda a produção nacional.

Os cimentos compostos – tipo CP II – apresentam uma redução da porcentagem em massa de clínquer e gesso, elevando o percentual das adições de materiais carbonáticos, escórias de alto-forno e/ou materiais pozolânicos, sendo identificado com o sufixo da adição predominante, respectivamente F, E e Z. Diferente

do CP I, o cimento composto é o mais utilizado no Brasil, representando 62,08% de todo o cimento produzido no país em 2012.

Os cimentos CP III e CP IV foram criados com o intuito da redução do consumo energético durante o processo de fabricação dos mesmos. Enquanto o CP III possui porcentagem considerável de escórias de alto-forno em sua composição, o CP IV utiliza material pozolânico. Devido a esses materiais apresentarem menor velocidade de hidratação, acabam tendo menor resistência à compressão inicial sem prejudicar o rendimento final. Em 2012 as produções anuais desses tipos foram de 14,15% e 14,84% respectivamente.

O cimento tipo CP V-ARI adquire alta resistência à compressão já nos primeiros dias do concreto endurecido. Apresenta em sua composição uma dosagem diferente de calcário e argila durante a produção do clínquer e, além disso, sua moagem resulta num pó de granulometria menor que os demais, e assim, ao entrar em contato com a água, sua reação é mais rápida. A produção anual do CP V-ARI representou 8,52% em 2012.

O CPB diferencia-se dos outros por sua coloração branca utilizada para fins arquitetônicos quando estrutural, ou rejuntamento de azulejos quando não estrutural. A cor branca é resultado das matérias primas com baixo teor de óxido de ferro e manganês durante o resfriamento e a moagem do produto. Em 2008 ele correspondia a apenas 0,17% da produção anual.

O cimento Portland resistente a sulfatos oferece a propriedade de resistência a meios sulfatados. Para ser classificado pertencente a esse tipo, conforme a NBR 5737 (1992), o cimento deve apresentar pelo menos umas das condições:

- ✓ Teores máximos de 8% de aluminato de cálcio no clínquer em massa e 5% de adições carbonáticas.
- ✓ Cimentos tipo CP III com escória granulada de alto-forno entre 60% e 70% em massa.
- ✓ Cimentos tipo CP IV com material pozolânico entre 25% e 40% em massa.

Por fim, o cimento Portland de baixo calor de hidratação, CP IV, é utilizado quando se necessita de uma taxa lenta de evolução do calor, evitando o surgimento de fissuras de origem térmica no interior do concreto de grandes estruturas.

A Tabela 2 mostra como os tipos de cimento se comportam em argamassas e concretos de maneira geral diante de diversos fatores de comparação.

Tabela 2 – Influência dos tipos de cimento nos concretos segundo a ABCP (2012).

Tipos de Cimento Portland	Resistência à compressão	Calor gerado na reação do cimento com a água	Impermeabilidade	Resistência aos agentes agressivos	Durabilidade
Comum e Composto	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
Alto-forno	Menor nos primeiros dias, maior no fim da cura	Menor	Maior	Maior	Maior
Pozolânico	Menor nos primeiros dias, maior no fim da cura	Menor	Maior	Maior	Maior
Alta Resistência Inicial	Muito maior nos primeiros dias	Maior	Padrão	Menor	Padrão
Resistente aos Sulfatos	Padrão	Padrão	Padrão	Maior	Maior
Branco Estrutural	Padrão	Maior	Padrão	Menor	Padrão
Baixo Calor de Hidratação	Menor nos primeiros dias, padrão no fim da cura	Menor	Padrão	Maior	Maior

4.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O cimento é determinante nas características e propriedades do concreto, principalmente na obtenção da resistência à compressão e durabilidade pretendidas, sendo quimicamente o material mais ativo que compõe a mistura e principal responsável na produção do resultado final desejado (ABCP, 2012).

Consoante Bauer (2013), as propriedades físicas do cimento Portland são analisadas sob três aspectos: o produto em pó; a mistura de cimento, água e proporções convenientes de pasta; e as argamassas.

As propriedades da pasta e argamassa do cimento possuem características que servem como parâmetro para elaboração de concretos e argamassas. Os métodos e especificações padronizados fazem uso de tais propriedades para o controle da aceitação do produto e/ou para avaliação de suas qualidades para fins de utilização.

- ✓ Densidade: A densidade absoluta do cimento Portland é considerada como 3,15, podendo variar para valores inferiores. O conhecimento desse valor favorece os cálculos do consumo do produto cuja mistura é feita com base no volume específico dos constituintes. A densidade aparente é da ordem de 1,5. A densidade é variável com o tempo na pasta de cimento, aumentando conforme o processo de hidratação, conforme Figura 7.

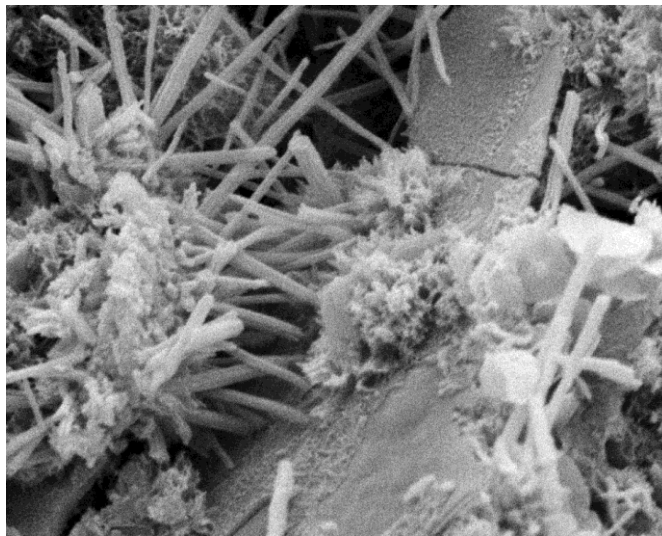


Figura 7 – Pasta de cimento hidratada segundo Alizadeh (2017).

- ✓ Finura: Está relacionada com o tamanho dos grãos do produto. É definida de duas maneiras: pela proporção em peso do material retido em peneira padronizada ou pelo valor da superfície específica obtido pela soma dos grãos contidos em um grama de cimento. A superfície específica do cimento controla a velocidade de reação de hidratação e também influencia em algumas características das argamassas, concretos e pastas. Quanto mais fino o cimento, melhor a resistência de primeira idade, menor exsudação e maior impermeabilidade, trabalhabilidade e coesão.
- ✓ Tempo de Pega: É compreendido pelo processo físico entre o início do endurecimento consequente ao processo químico de hidratação. A partir de um determinado tempo, quando o processo de pega alcança determinado estágio, a pasta não admite operação de remistura, deixando assim de ser trabalhável. Esse é o prazo disponível para as operações de manuseio das argamassas e concreto, findando este período, os materiais devem permanecer em repouso em sua posição definitiva para que

aconteça a cura. Usando o aparelho de Vicat, é possível fazer a caracterização da pega dos cimentos. O ensaio é feito com pasta de consistência normal sendo medida, em última análise, a resistência à penetração da agulha na pasta.

Visando a otimização da dosagem dos constituintes na fabricação dos cimentos, encontram-se na literatura alguns índices, módulos e relações. Dentre eles o índice de hidraulicidade de Vicat, que delimita as proporções dos diferentes constituintes do cimento com o propósito de relacionar o índice com as características do produto, tem-se:

$$I = \frac{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}{\%CaO} \quad (1)$$

Vicat afirmava que o valor desses índices define as propriedades hidráulicas dos aglomerantes, apresentando o cimento de pega lenta o índice entre 0,50 e 0,65.

Com objetivo de limitar a presença de cal livre no produto acabado, cujo resultado é a expansão patológica nos concretos, Le Chatelier estabeleceu a seguinte relação:

$$\%CaO_{\text{máx}} = 2,8\%,SiO_2 + 1,64\%,Al_2O_3 \quad (2)$$

A Tabela 3 evidencia os limites inferior e superior de resistência à compressão dos cimentos utilizados neste estudo, sendo todos de classe 32 e seguindo as normas vigentes.

Tabela 3 – Limites de resistência de cada tipo de cimento modificado de NBRs 11578 (1991), 5736 (1991) e 5733 (1991).

Tipos de Cimento Portland	Classe	Resistência à Compressão	
		Limite Inferior	Limite Superior
Composto (CP II)	32	32 MPa (28 dias)	49 MPa (28 dias)
Pozolânico (CP IV)	32	32 MPa (28 dias)	49 MPa (28 dias)
Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)	-	34 MPa (7 dias)	-

Dos cimentos empregados nesta análise, o CP IV-RS exige maior tempo de cura, uma vez que possui baixo calor de hidratação e lento ganho de resistência à compressão (NEVILLE, 2013). Das diversas patologias as quais o concreto está sujeito, a corrosão das armaduras é apontada como o principal processo de degradação das estruturas de concreto armado. Segundo Medeiros (2017), os cimentos resistentes a sulfatos são recomendados para obras em regiões litorâneas, subterrâneas e marítimas, pois eles oferecem uma resistência maior aos meios agressivos sulfatados, como por exemplo, estações de tratamento de esgoto, água do mar (Figura 8) e alguns solos específicos.



Figura 8 – Estrutura de concreto armado em contato com água marítima segundo Corsini (2013).

Alguns estudos realizados por Paiva; Oliveira (2009) e Medeiros-Junior *et al.* (2014), embora tenham sido feitos com outra finalidade, mostraram a resistência à compressão do concreto moldado com tipos distintos de cimento. Para analisá-los, os resultados foram separados e demonstrados apenas aqueles relevantes para o presente trabalho.

Paiva; Oliveira (2009) moldaram corpos de prova com concreto utilizando os tipos de cimento CP II-F-32, CP II-Z-32, CP IV-32 e CP V-ARI dentre outros, que foram rompidos aos 3, 7 e 28 dias de idade, com os resultados conforme a Figura 9. Já Medeiros-Junior *et al.* (2014) utilizou os tipos CP II-F-32, CP IV-32 e CP V-ARI além de outros, rompendo-os aos 7, 28 e 91 dias de idade, repetindo os processos para relação água/cimento equivalente a 0,40, 0,50 e 0,60. Para esta análise, os resultados considerados foram aqueles com relação água/cimento igual a 0,50 por apresentarem valores intermediários, como observado na Figura 10.

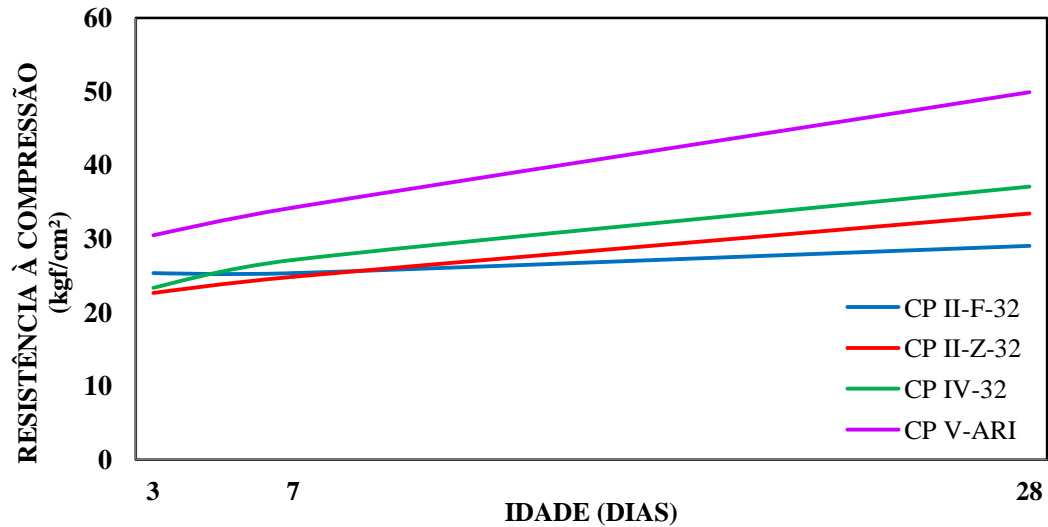


Figura 9 – Resistência média à compressão do concreto com diferentes tipos de cimento, modificado de Paiva; Oliveira (2009).

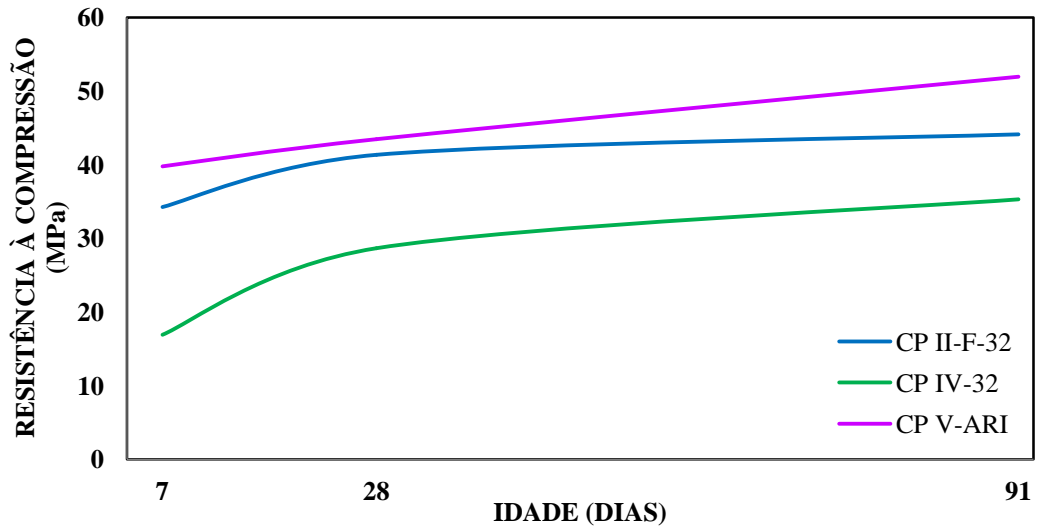


Figura 10 – Resistência média à compressão do concreto com diferentes tipos de cimento, modificado de Medeiros-Junior *et al.* (2014).

Cabe-se ainda uma análise das resistências à compressão do cimento fornecidas pela ABCP (2012) na Figura 11, mesmo que não sejam feitas pela ruptura do concreto, e sim uma pasta de cimento padronizada, é possível a utilização deste como parâmetro.

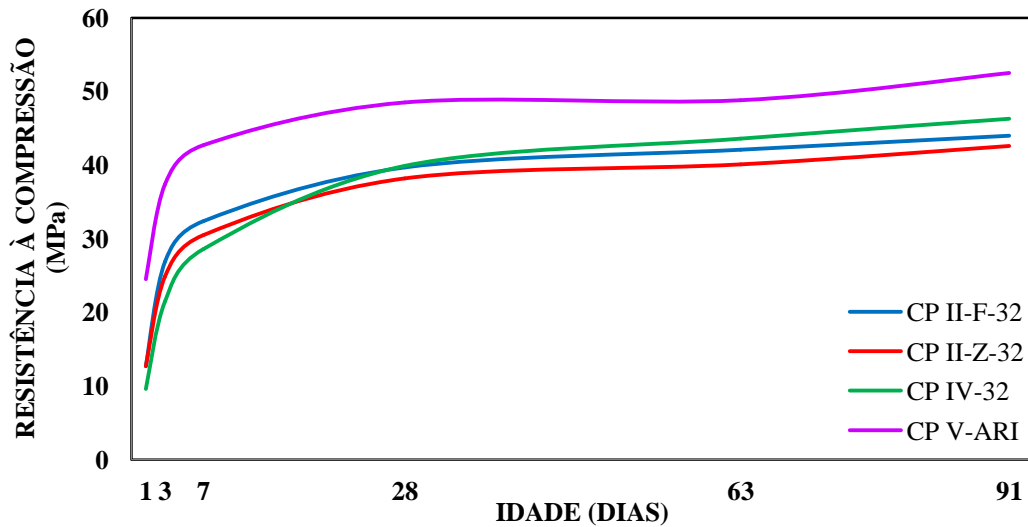


Figura 11 - Resistência média à compressão de diferentes tipos de cimento Portland, modificado de ABCP (2012).

Como nota-se nas Figuras 9 e 10, os concretos cujo cimento tem uma composição mais pura, com grande percentual de clínquer e gesso, como é o caso do CP V-ARI, apresentou resistência à compressão maior em todas as idades proporcionado pelos compostos cálcicos que agem de forma mais efetiva no processo de endurecimento da pasta, além da alta resistência à compressão inicial, também obteve maiores valores absolutos ao final dos 28 e 91 dias, respectivamente. Comparando com a resistência do cimento obtida pela ABCP (2012), observa-se que ocorreu comportamento semelhante.

Os concretos que contêm adições, sobretudo de pozolana, como o CP IV-32, apresentaram valores iniciais menores, mas evoluindo com idades mais avançadas. No primeiro caso, feito por Paiva; Oliveira (2009), ultrapassou os demais tipos com exceção do CP V-ARI, e no segundo caso, de Medeiros-Junior *et al.* (2014) ficou abaixo de todos estudados. Quando comparados com a Figura 11, nota-se o mesmo comportamento que o obtido por Paiva; Oliveira (2009).

No concreto com os tipos de cimento compostos, CP II-F-32 e CP II-Z-32, também houve divergências nos valores apresentados entre eles. Ambos demonstram resistência com valores absolutos inferiores ao CP V-ARI, porém a Figura 10 os mostra com resistências superiores ao CP IV-32, e na Figura 9 acontece o oposto, assemelhando-se com a Figura 11.

Outra maneira de analisar os dados é pela porcentagem de ganho de resistência entre os valores iniciais e o absoluto, conforme a Tabela 4 e as Figuras 12, 13 e 14,

referentes respectivamente aos resultados de Paiva; Oliveira (2009), Medeiros-Junior *et al.* (2014) e ABCP (2012).

Tabela 4 – Variação percentual entre valores iniciais e finais dos três trabalhos analisados.

Tipo de Cimento	Variação percentual entre valores iniciais e absolutos (%)		
	Paiva; Oliveira (2009) [3-28 dias]	Medeiros-Junior <i>et al.</i> (2014) [7-91 dias]	ABCP (2012) [7-91 dias]
CP II-F-32	14,61	28,72	35,80
CP II-Z-32	47,48	-	39,67
CP IV-32	58,83	108,63	61,89
CP V-ARI	63,77	30,59	22,95

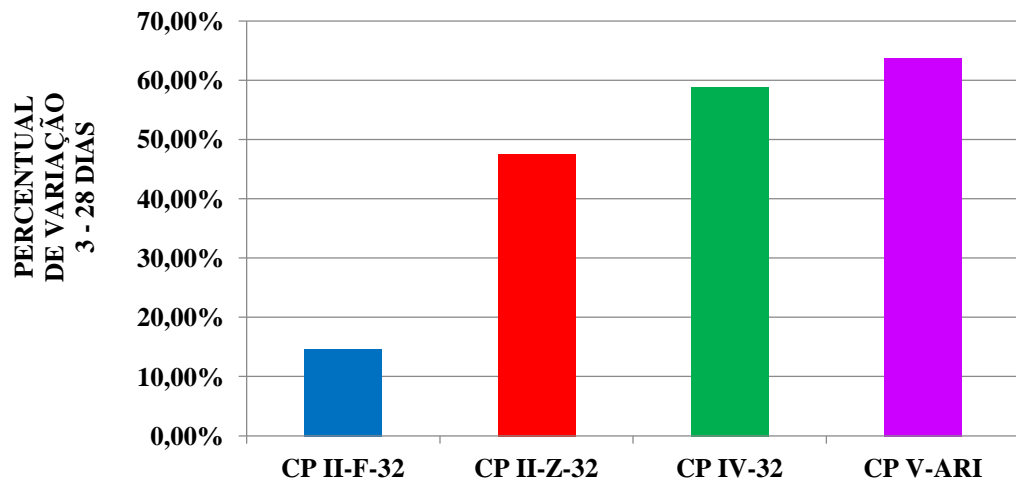


Figura 12 – Variação percentual da resistência média à compressão obtida entre 3 e 28 dias modificado de Paiva; Oliveira (2009).

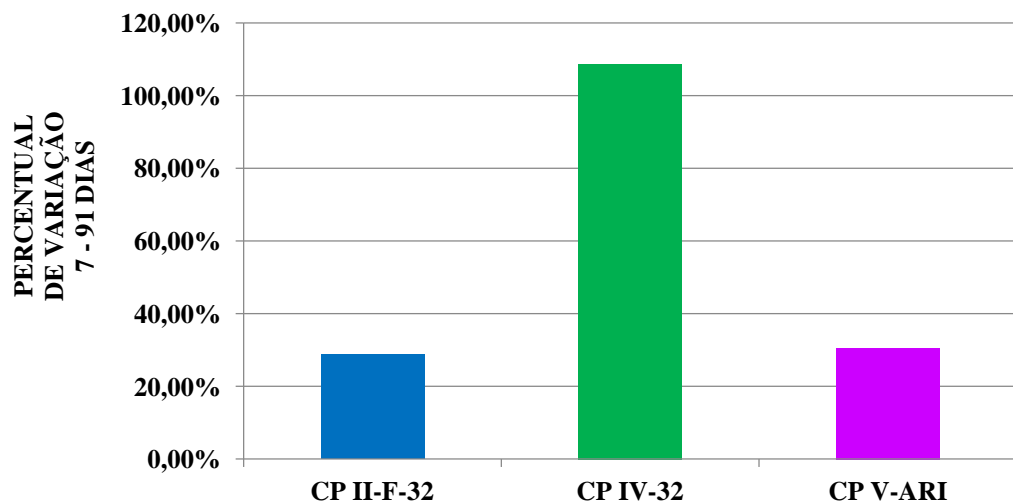


Figura 13 – Variação percentual da resistência média à compressão obtida entre 7 e 91 dias modificado de Medeiros-Junior *et al.* (2014).

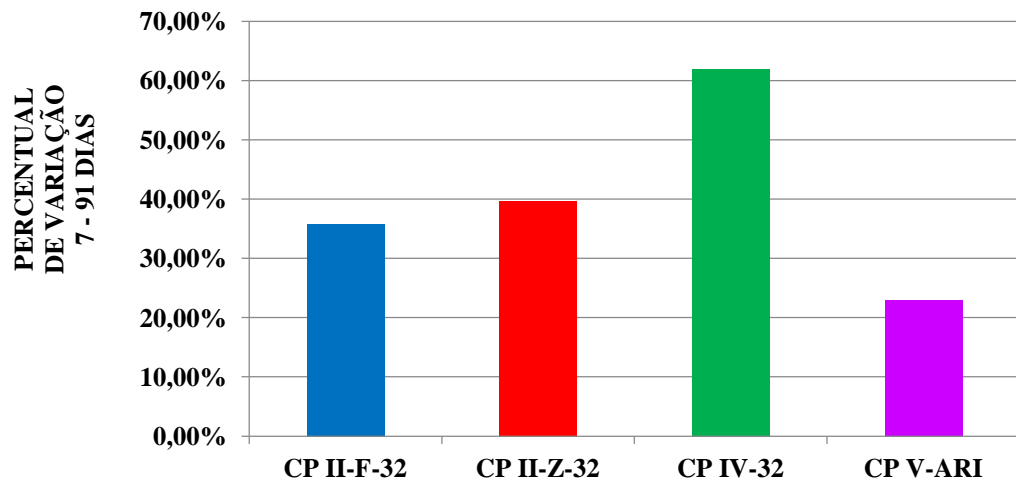


Figura 14 – Variação percentual da resistência média à compressão obtida entre 7 e 91 dias modificado de ABCP (2012).

Nota-se que o CP II-F-32 apresentou resultados parecidos entre os três trabalhos analisados, aumentando em torno de 30% de resistência à compressão até atingir os resultados absolutos. Neste tipo de cimento o percentual de ganho de resistência é baixo porque em sua composição há bastante clínquer e gesso, juntamente com o fíler, auxiliando no preenchimento de vazios, ganhando considerável resistência inicial. O CP II-Z-32, também obteve resultados parecidos ganhando em média 44% de resistência à compressão. Os valores são superiores ao tipo anterior pois ele se assemelha ao CP IV-32, tendo em sua composição uma porcentagem de pozolana, proporcionando tempo de pega maior.

Os demais tipos de cimento apresentaram resultados divergentes entre si. O CP IV-32 seguiu um padrão de ganho de resistência à compressão percentual da ordem de 60%, exceto o resultado mostrado por Medeiros-Junior *et al.* (2014), que diferiu do restante, variando quase 109%. O CP IV-32 sofre variação de resistência (entre inicial e final) de mais de 50% ocasionada pelas reações de hidratação mais lentas, contudo progressivas características deste tipo de cimento. Para o CP V-ARI, é comum que sua variação percentual de resistência inicial e final seja menor, devido ao seu alto ganho inicial de resistência à compressão. Dois dos três trabalhos analisado confirmaram essa teoria, apresentando média de 27%, enquanto o resultado obtido por Paiva; Oliveira (2009) teve uma alta variação de 63%.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 TRAÇO

O concreto é composto por aglomerante, água, agregado graúdo e miúdo, ou seja, cimento, água, areia e brita, sendo que para a realização deste estudo, a brita escolhida foi de graduação nº 01. O traço foi calculado de acordo com o método INT (Instituto Nacional de Tecnologia), optando-se pela Condição “A” de mistura, isto é, todos os materiais separados em massa e com desvio padrão máximo de 4,0 MPa. Para a resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) adotado de 30 MPa, resultou no seguinte traço calculado em massa 1 : 1,22 : 2,25 : 0,43, referente a quantidade em massa dos materiais: cimento, areia, brita e água (Figura 15), respectivamente. Para este traço, obteve-se o consumo de cimento de 487,02 kg/m³.



Figura 15 – Componentes do concreto.

Para iniciar o processo de fabricação do concreto, alguns procedimentos foram seguidos para melhor desempenho do material a ser obtido, como a secagem em estufa dos agregados miúdos e graúdos, com porções de aproximadamente 25 kg distribuídos em três bandejas, proporcionando assim, uma maior área de contato que possibilitou resultados mais efetivos na distribuição uniforme de calor, conforme a Figura 16. Os elementos supracitados ficaram confinados por 24 horas à temperatura aproximada de 180° C e, depois de retirados da estufa, ficaram em descanso por uma hora para o resfriamento à temperatura ambiente. Posteriormente os materiais foram ensacados e

estocados como mostra a Figura 17, protegidos contra intempéries até a data agendada para seu uso.



Figura 16 – Secagem do agregado miúdo em estufa.



Figura 17 – Materiais ensacados protegidos contra intempéries.

5.2 ENSAIO GRANULOMÉTRICO

Foi realizado o ensaio para a determinação da composição granulométrica segundo a NBR NM 248 (2003) tanto para o agregado miúdo quanto para o gráudo, utilizando respectivamente amostras de 1 kg e 2 kg. As peneiras foram limpas previamente de ambos os lados e pesadas em balança digital, em seguida foram dispostas com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo, com fundo e tampa no agitador mecânico, observado na Figura 18. Para o agregado miúdo foram

utilizadas as peneiras de nº 70, 50, 40, 30, 20 e 16. Já para o agregado graúdo, as peneiras com malha de $\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{4}$ " e 1".



Figura 18 – Peneiras de ensaio granulométrico: a) Limpeza; b) Disposição sobre o agitador mecânico.

O procedimento de peneiragem foi realizado separadamente para o agregado miúdo e para o graúdo, que foram depositados sobre a peneira do topo, fechada e agitada manualmente por um minuto com movimentos laterais e circulares alternados. Após a agitação manual, o conjunto de peneiras foi colocado no agitador mecânico e travado, onde ficaram em vibração por mais um minuto. Findo este processo, cada peneira foi pesada individualmente para a coleta dos dados de massa retida do agregado, visto na Figura 19.

Segundo o fabricante, as peneiras utilizadas atendem as exigências da NM ISO 3310-1 (2010).



Figura 19 – Pesagem da peneira com agregado graúdo.

5.3 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA E ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (*SLUMP TEST*)

Para a realização da moldagem dos CPs, os quatro materiais constituintes do concreto foram separados em massa com o auxílio de balança digital. Antecipadamente, toda a areia e cimento utilizados foram peneirados, evitando que houvesse eventuais matérias orgânicas, seixos ou cimento empedrado (Figura 20), diminuindo assim a probabilidade de alterações nos resultados.

Os materiais foram separados e pesados de acordo com o traço, respeitando o volume mínimo de 30 litros por betonada para ensaios de resistência à compressão conforme a NBR NM 33 (1998), já incluso o percentual de 10% da soma necessária para a moldagem de todos os CPs.

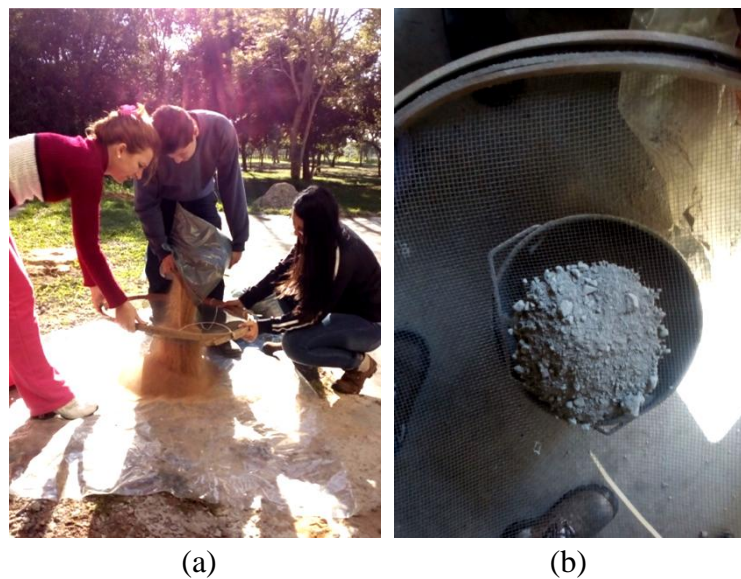


Figura 20 – Peneiramento dos componentes do concreto: a) Areia; b) Cimento.

O balão da betoneira foi previamente umedecido e em seguida dispostos os materiais de acordo com a NBR 12821 (2009), seguindo os passos:

- 100% do agregado graúdo + aproximadamente $\frac{1}{3}$ da água;
- 100% do cimento + aproximadamente $\frac{1}{3}$ da água;
- 100% do agregado miúdo + água remanescente.

Limitando-se a intervalos de dois minutos entre os procedimentos indicados acima, seguidos de mais dois minutos para a mistura final.

Após o concreto pronto, foi retirada uma amostra para a determinação da consistência por meio do abatimento do tronco de cone (*slump test*) obedecendo aos critérios apresentados pela NBR NM 67 (1998).

Foram umedecidos o molde e a placa de base, nivelando-a com areia e auxílio do nível de mão, como mostra a Figura 21. O molde foi posicionado sobre a base e o operador apoiou seus pés nas aletas laterais de tal forma que o molde não se deslocasse. A partir do início do preenchimento do molde, foi cronometrado o tempo total do ensaio com vistas a não ultrapassar 150 segundos. O molde foi preenchido em três camadas, cada uma delas compactada pela haste de socamento com 25 golpes distribuídos uniformemente sobre a seção de cada camada, fazendo movimentos cônicos até o centro. Na camada superior, após o adensamento, realizou-se o rasamento, que consiste na regularização do topo com uma colher de pedreiro. Para a retirada do tronco de cone, a base metálica foi limpa e a retirada foi feita na vertical, respeitando o intervalo de tempo entre 5 e 10 segundos, aferido com um cronômetro ativado para esta finalidade.



Figura 21– Nivelamento da placa de base.

Para o traço calculado, adotou-se o abatimento de $8 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$, com consistência plástico a mole. Para a verificação do abatimento do concreto realizado, subsequente ao último passo descrito foi aferida a diferença com régua metálica entre a altura do molde e a altura do concreto fresco, utilizando como parâmetro o ponto médio.

Finalizado o ensaio do tronco de cone, iniciou-se a moldagem dos corpos de prova. Foi realizada a limpeza prévia dos CPs, desmontando-os e escovando com palhas e escovas de aço. Foi aplicada, com auxílio de pincel, uma fina camada de desmoldante do lado interno e externo dos CPs para facilitar a futura desmoldagem, visto na Figura

22. As moldagens foram feitas de acordo com a NBR 5738 (2015) em 10 corpos de prova cilíndricos de aço com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.



Figura 22 – Aplicação do desmoldante nos corpos de prova.

Para CPs com diâmetro de 100 mm e compactação manual, como prescrito em norma, a deposição do concreto foi dividida em duas camadas, utilizando a haste de adensamento, cada camada foi compactada com 12 golpes, distribuindo-os sobre a seção transversal do molde. Após a colocação da camada superior de concreto, a face externa do molde foi golpeada para o preenchimento de eventuais vazios. O adensamento da camada superior e o rasamento foram feitos da mesma forma que o *slump test*, sendo etiquetados ao término deste processo para identificar o CP, como mostra a Figura 23. Os corpos de prova foram moldados em local já nivelado com blocos cerâmicos sobre areia para evitar a deformação do concreto pós-moldagem.



Figura 23 – Moldagem e identificação dos corpos de prova.

Para a cura inicial os CPs permaneceram em superfície horizontal rígida sem interferência de vibrações e protegido de intempéries por um período de aproximadamente 24 horas, seguindo à desmoldagem, identificando-os com giz de cera, mostrado pela Figura 24. Após a identificação, ficaram submersos em reservatório estanque com água potável não corrente com solução saturada de hidróxido de cálcio (popularmente conhecida como cal) sem exposição a gotejamento, incidência de raios solares, água em movimento e protegida de contaminações até o momento do ensaio, constatada pela Figura 25.



Figura 24 – Corpos de prova desmoldados e identificados.

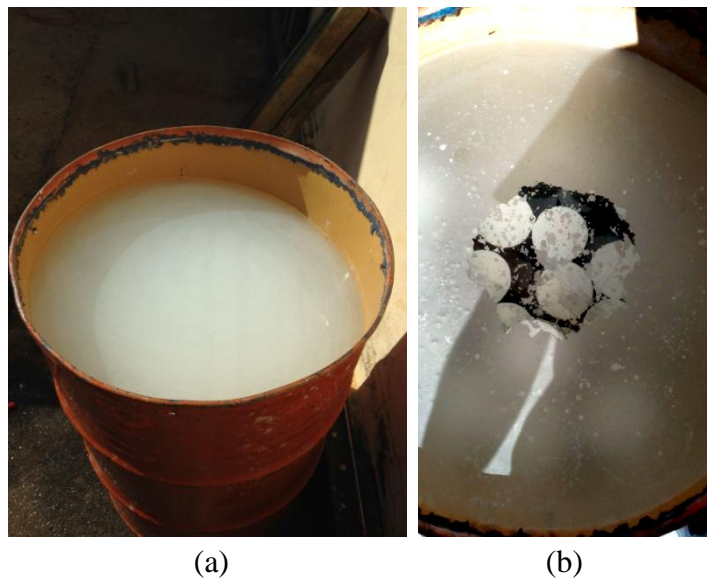


Figura 25 – Tanque de cura: a) Reservatório com solução saturada de hidróxido de cálcio; b) Corpos de prova imersos no tanque.

Todo o processo descrito neste capítulo foi realizado para os quatro tipos de cimento em estudo, considerando o mesmo traço, cada um deles em uma betonada diferente com o intuito de analisar a diferença de resistência à compressão de acordo com o tipo de cimento utilizado, totalizando a moldagem de 40 corpos de prova. Os aglomerantes em estudo foram: CP II-F-32 (Cimento Portland composto com fíler), CP II-Z-32 (Cimento Portland composto com pozolana), CP IV-32-RS (Cimento Portland pozolânico resistente a sulfatos) e CP V-ARI (Cimento Portland de alta resistência inicial).

5.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

A verificação da resistência à compressão do concreto deu-se por meio da realização de ensaios de compressão axial com corpos de prova aos 3, 7, 14, 28 e 105 dias de idade, com o rompimento de dois CPs em cada um dos dias mencionados seguindo as recomendações da norma NBR 5739 (2007).

Os corpos de prova mencionados, depois de retirados do tanque de cura, tiveram suas faces limpas e secas, em seguida aferiu-se com o auxílio de paquímetro e régua metálica as dimensões do diâmetro e altura dos CPs, que para ambos os casos foram medidos duas vezes em diferentes posições, calculando-se a média dos valores apresentados, definindo assim a relação altura/diâmetro (h/d) prescrita em norma, na qual não se deve obter valores maiores que 2,02, e caso sejam menores que 1,94, deve-se utilizar o fator de correção.

A regularização das bases dos corpos de prova foi possível com o auxílio do sistema de capeamento não colado, utilizando discos de neoprene com diâmetro de 100 mm, espessura de 13 mm e dureza Shore 70, confinados em pratos de aço, mostrado na Figura 26. Segundo a norma americana ASTM C 1231 (2000), há um limite de reuso do disco de acordo com a resistência à compressão e a dureza conforme Tabela 5.

O capeamento com neoprene foi utilizado como forma de regularizar eventuais imperfeições na base resultante da moldagem dos CPs e segundo resultados mostrados por Menezes (2011), que realizou um estudo mostrando as diferenças de resistência à compressão com diferentes tipos de capeamento, o neoprene apresentou resultados

satisfatórios e bem próximos do mesmo processo feito com enxofre, por vezes até superando-o quando a resistência foi maior que 40 MPa.



Figura 26 – Capeamento do corpo de prova com neoprene.

Tabela 5 – Características de reuso do neoprene modificado de ASTM C 1231 (2000).

Resistência à Compressão do Corpo de Prova [MPa]	Dureza [Shore A]	Teste de Qualificação	Número Máximo de Reuso
10 a 40	50	Não	100
17 a 50	60	Não	100
28 a 50	70	Não	100
50 a 80	70	Requerido	50
Maior que 80	–	Não Permitido	–

Os ensaios de compressão axial foram realizados por meio de prensa eletrohidráulica e dentro das tolerâncias de tempo descritas na Tabela 6, segundo a NBR 5739 (2007), contando-se a partir do horário de início da moldagem. A prensa eletrohidráulica manual utilizada é da marca Solotest e tem capacidade de carga máxima de 100 toneladas-força.

As faces dos pratos da prensa também foram limpas e secas, em seguida, posicionados os CPs sobre o prato inferior, centralizando-os com o auxílio dos círculos concêntricos de referência, de maneira que as tensões fossem distribuídas uniformemente sobre toda a seção dos CPs.

Tabela 6 – Tolerância para idade de ensaio modificado de NBR 5739 (2007).

Idade de Ensaio	Tolerância Permitida
3 dias	2 horas
7 dias	6 horas
14 dias	12 horas
28 dias	24 horas
105 dias	54 horas

Por norma, a velocidade de carregamento do ensaio deve ser de 0,45 MPa/s, havendo uma tolerância de $\pm 0,15$ MPa/s, aplicada de forma contínua e sem choques. Para o ensaio do trabalho, em se tratando de uma prensa na qual a velocidade é controlada manualmente, foram estimadas as resistências de todos os corpos de prova tendo como parâmetro os materiais de auxílio deste trabalho, podendo assim garantir o tempo mínimo e máximo necessário de ruptura de todos os CPs (Figura 27).

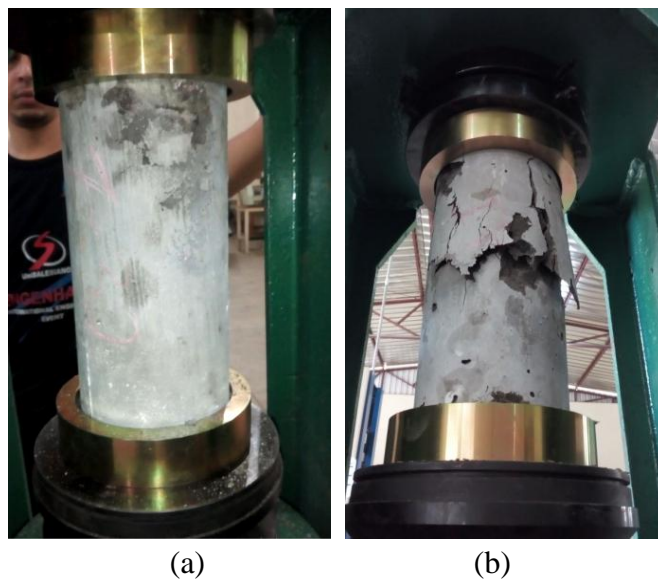


Figura 27 – Rompimento dos CPs usando-se prensa eletrohidráulica: a) Compressão do corpo de prova; b) Corpo de prova rompido.

Após o rompimento dos corpos de prova (Figura 28), os tipos de ruptura foram analisados e classificados de acordo com o Anexo A da NBR 5739 (2007).



Figura 28 – Corpos de prova rompidos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O ensaio de granulometria por peneiramento tem como objetivo a determinação da composição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo para o concreto. Foram utilizadas para este ensaio as peneiras indicadas na Tabela 7, seguido das suas respectivas aberturas de malha, classificadas como série normal ou intermediária. O número da peneira refere-se à abertura da malha ou ao número de malhas quadradas por polegada linear, como por exemplo, a peneira nº 16 correspondente a 16 aberturas em 1".

Tabela 7 – Peneiras: classificação e abertura da malha.

Agregado Miúdo		
Número da Peneira	Série Normal	Série Intermediária
16	1,18 mm	-
20	-	0,84 mm
30	0,60 mm	-
40	-	0,42 mm
50	0,30 mm	-
70	-	0,21 mm
Agregado Graúdo		
Número da Peneira	Série Normal	Série Intermediária
1"	-	25,0 mm
3/4"	19,0 mm	-
1/2"	-	12,5 mm
3/8"	9,5 mm	-

A areia, classificada como agregado miúdo, é separada em frações granulométricas conforme NBR 7214 (1982) representada na Tabela 8.

Tabela 8 – Frações granulométricas da areia modificado de NBR 7214 (1982).

Material retido entre as peneiras de abertura nominal	Denominação
2,4 mm e 1,2 mm	Grossa
1,2 mm e 0,6 mm	Média Grossa
0,6 mm e 0,3 mm	Média Fina
0,3 mm e 0,15 mm	Fina

Foi utilizada uma amostra de 1 kg de areia para o ensaio granulométrico do agregado miúdo. Os resultados obtidos foram analisados e tabulados (Tabela 9), posteriormente foi confeccionada a curva granulométrica, mostrada na Figura 29. Para a

confeção da curva foi fixada no eixo das abscissas, em escala logarítmica, a granulometria das partículas e no eixo das ordenadas, utilizando a escala natural, os percentuais passantes na peneira.

Tabela 9 – Resultados do ensaio de granulometria do agregado miúdo.

Número da Peneira	Classif.	Abertura Peneira (mm)	Massa Retirada (g)	% Retida na Peneira	% Retida Acumulada	% Passante na Peneira
16	Normal	1,18	46	4,60	4,60	95,40
20	Intermed.	0,84	78	7,80	12,40	87,60
30	Normal	0,60	236	23,60	36,00	64,00
40	Intermed.	0,42	324	32,40	68,40	31,60
50	Normal	0,30	164	16,40	84,80	15,20
70	Intermed.	0,21	90	9,00	93,80	6,20
Fundo			62	6,20	100,00	0,00
Σ			1000	100,00	-	-

A porcentagem retida em cada peneira é obtida pela relação do material retido e o peso total da amostra, multiplicado por 100. Somando-se os percentuais retidos nas peneiras anteriores, com o da peneira em estudo, obtêm-se a porcentagem acumulada. A relação entre o peso do material passante em cada peneira e o peso total da amostra corresponde à porcentagem passante na peneira.

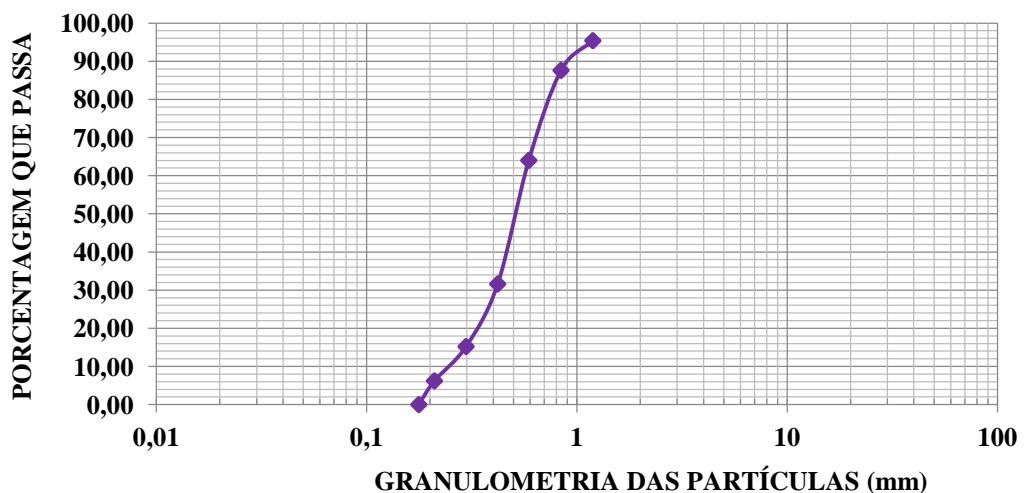


Figura 29 – Curva granulométrica do agregado miúdo.

A análise da curva granulométrica demonstrou que o agregado miúdo utilizado foi classificado como areia média, pois 70% do seu desenvolvimento esteve compreendido entre o intervalo de 0,3 mm e 1,2 mm.

Obtiveram-se também por meio deste ensaio, o parâmetro de dimensão máxima característica, que corresponde à abertura nominal da malha da peneira na qual a porcentagem acumulada é inferior ou igual a 5%, e o módulo de finura da amostra, dado pela soma dos percentuais acumulados em todas as peneiras da série normal, dividida por 100. O material é considerado como mais grosso quanto maior for o seu módulo de finura.

✓ Dimensão máxima característica: 1,18 mm.

✓ Módulo de finura:

$$\frac{\sum \%ret.acum (normal)}{100} = \frac{4,6+36+84,8}{100} = 1,254 \quad (3)$$

Por sua vez, as britas, agregado graúdo, são comercialmente classificadas de acordo com sua faixa de granulometria, indicada pela Tabela 10.

Tabela 10 – Classificação das britas conforme faixa de granulometria modificado de Ministério de Minas e Energia (2017).

Brita	Faixa Granulométrica
Brita 5	76 mm a 100 mm
Brita 4	50 mm a 76 mm
Brita 3	25 mm a 50 mm
Brita 2	19 mm a 25 mm
Brita 1	9,5 mm a 19 mm
Brita 0 ou Pedrisco	4,8 mm a 9,5 mm
Pó de Pedra	0 mm a 5 mm

Para o ensaio granulométrico deste agregado foi utilizada uma amostra de 2 kg. Os resultados obtidos, dispostos na Tabela 11, foram utilizados para composição da curva granulométrica na Figura 30.

Tabela 11 – Resultados do ensaio de granulometria do agregado graúdo.

Número da Peneira	Classif.	Abertura Peneira (mm)	Massa Retirada (g)	% Retida na Peneira	% Retida Acumulada	% Passante na Peneira
1"	Intermed.	25,0	0	0,00	0,00	100,00
3/4"	Normal	19,0	42	2,10	2,10	97,90
1/2"	Intermed.	12,5	1550	77,50	79,60	20,40
3/8"	Normal	9,5	280	14,00	93,60	6,40
Fundo			128	6,40	100,00	0,00
Σ			2000	100,00	-	-

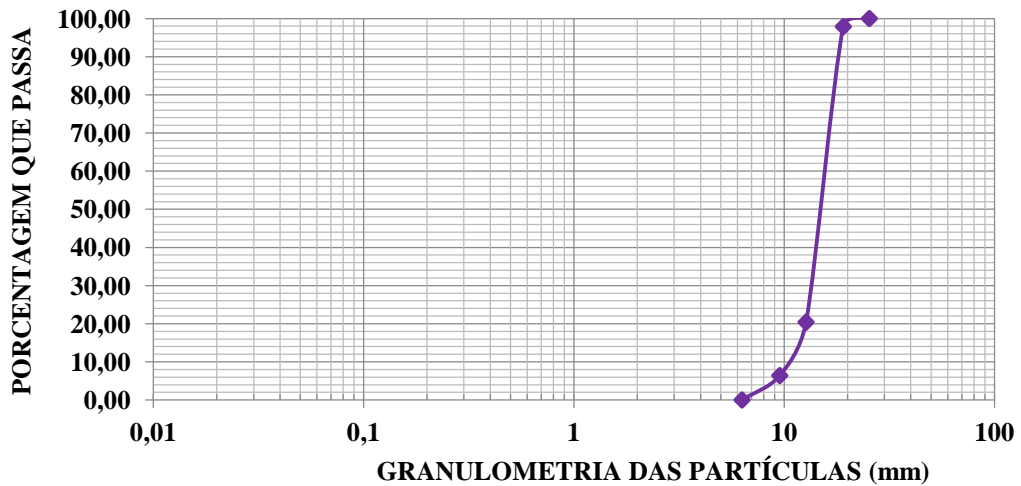


Figura 30 – Curva granulométrica do agregado graúdo.

Conforme análise da curva granulométrica apresentada, aproximadamente 90% do agregado manteve-se na faixa de granulometria de Brita 1, atendendo o critério utilizado para a elaboração do traço empregado neste estudo. Também foi possível por meio deste ensaio determinar a dimensão máxima característica e módulo de finura da amostra.

- ✓ Dimensão máxima característica: 19,0 mm.
- ✓ Módulo de finura:

$$\frac{\sum \%ret.acum (normal)}{100} = \frac{2,10+93,6}{100} = 0,957 \quad (4)$$

Para análise do concreto fresco foi utilizado o ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*). O concreto obtido com a utilização do aglomerante CP II-F-32 apresentou abatimento de 19 cm, como mostra a Figura 31. Este supera o dobro do abatimento de projeto que fora calculado para $8 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$. Pode-se justificar como possível causa deste comportamento a composição do cimento, que possui em sua mistura um percentual elevado de fíler calcário, entre 6% e 10%, proporcionando maior trabalhabilidade ao concreto devido à finura das partículas do fíler que se alojam entre os grãos dos demais componentes da mistura. Aliado a isto, a granulometria do agregado graúdo influenciou no descrito resultado, uma vez que não estava totalmente uniforme com a brita do traço calculado (brita 1), com a presença de aproximadamente 10% de brita 0 e 2. O tempo de início de pega, que se dá após 1 hora, também pode ter sido um fator que colaborou para esta consistência.



Figura 31 – *Slump test* do concreto com cimento CP II-F-32.

Já o resultado do *slump test* com valor de 16,5 cm do concreto confeccionado com CP II-Z-32, Figura 32, também acima do dobro do abatimento de projeto, pode ser explicado devido à elevada porcentagem de materiais pozzolânicos compreendida entre 6% e 14%, somados a adição de materiais carbonáticos entre 0 a 10%. Estas duas adições conferem trabalhabilidade ao concreto devido à sua finura e também ao intervalo de início de pega após 1 hora.

A consistência dos concretos com estes dois tipos de cimento assemelham-se e se justificam devido à produção destes cimentos compostos serem igualmente padronizados. Sendo assim, ambos apresentam poucas ou nenhuma disparidade em suas propriedades químicas, físicas e mecânicas, distinguindo entre si apenas o percentual, o tipo de adição e ainda o teor de resíduo insolúvel, que é determinado por ensaio que verifica a insolubilidade parcial do clínquer e a solubilidade parcial do constituinte pozzolânico, este último não sendo material de análise do presente estudo.



Figura 32 – *Slump test* do concreto com cimento CP II-Z-32.

Na Figura 33, é possível observar que a consistência do concreto fresco de 14 cm é próxima ao dobro da calculada. Neste concreto foi utilizado o cimento CP IV-32-RS, que possui características físicas semelhantes ao CP II-Z-32. No entanto, há elevado teor de materiais pozolânicos variando entre 25% e 40%, devendo apresentar aos 28 dias, no mínimo 75% de sua atividade de reação, verificado mediante ensaio específico.



Figura 33 – *Slump test* do concreto com cimento CP IV-32-RS.

Por sua vez, o concreto obtido com cimento CP V-ARI, de acordo com o que ilustra a Figura 34, apresentou *slump test* de 6,0 cm, em conformidade ao abatimento de projeto, calculado de $8 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$. Pode-se afirmar que este comportamento justifica-se devido à finura do material com área específica na ordem de $300 \text{ m}^2/\text{kg}$, sendo maior que os demais analisados, além do tempo de início de pega ser menor que 1 hora.



Figura 34 – *Slump test* do concreto com cimento CP V-ARI.

As variações das consistências obtidas para cada tipo de concreto estudado foram dispostas graficamente, possibilitando fácil visualização do comportamento do concreto fresco, conforme Figura 35.

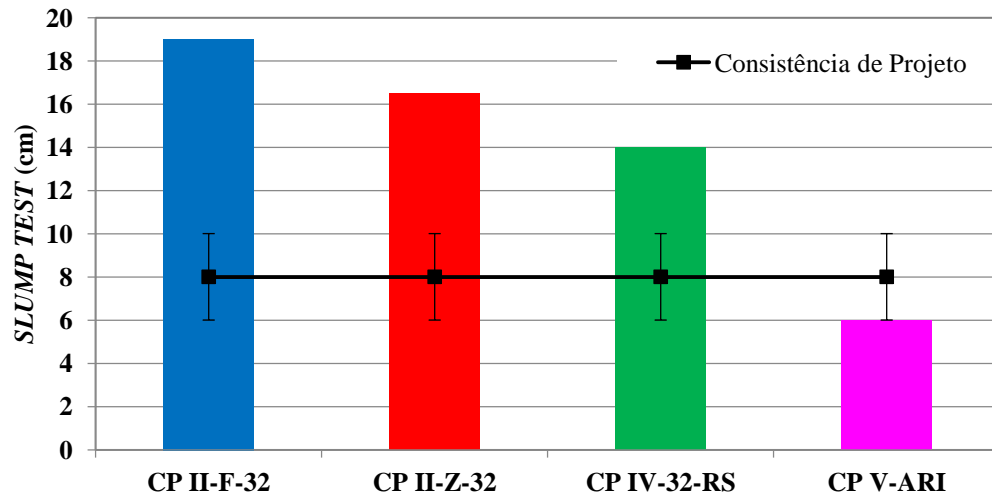


Figura 35 – Consistência de projeto e *slump tests* obtidos.

Seguindo as especificações da NBR 5739 (2007), foram aferidos a altura e o diâmetro dos 40 corpos de prova para o cálculo da relação h/d definida pela Equação 5 e mostrada pelas Tabelas 12, 13, 14 e 15.

$$\text{Relação h/d} = \frac{\text{Altura do corpo de prova [mm]}}{\text{Diâmetro do corpo de prova [mm]}} \quad (5)$$

Tabela 12 – Relação h/d dos CPs moldados com cimento CP II-F-32.

Idade do CP	Número do CP	Diâmetro do CP [mm]	Altura do CP [mm]	Relação h/d
3 dias	1	98,0	198,0	2,02
	2	97,5	196,5	2,01
7 dias	1	98,0	198,5	2,02
	2	98,0	198,0	2,02
14 dias	1	98,0	198,0	2,02
	2	97,5	197,5	2,02
28 dias	1	97,5	196,0	2,01
	2	98,0	196,0	2,00
105 dias	1	98,0	197,0	2,01
	2	97,5	197,5	2,02

Tabela 13 – Relação h/d dos CPs moldados com cimento CP II-Z-32.

Idade do CP	Número do CP	Diâmetro do CP [mm]	Altura do CP [mm]	Relação h/d
3 dias	1	97,5	197,5	2,02
	2	98,5	199,0	2,02
7 dias	1	98,5	199,0	2,02
	2	98,0	195,0	1,99
14 dias	1	97,5	196,5	2,01
	2	98,0	197,5	2,01
28 dias	1	98,5	198,0	2,01
	2	99,0	197,0	1,98
105 dias	1	98,0	198,0	2,02
	2	97,5	197,0	2,02

Tabela 14 – Relação h/d dos CPs moldados com cimento CP IV-32-RS.

Idade do CP	Número do CP	Diâmetro do CP [mm]	Altura do CP [mm]	Relação h/d
3 dias	1	98,0	197,5	2,01
	2	97,5	197,0	2,02
7 dias	1	97,5	197,0	2,02
	2	98,0	198,0	2,02
14 dias	1	98,5	198,5	2,01
	2	98,0	198,0	2,02
28 dias	1	98,5	199,0	2,02
	2	98,5	199,0	2,02
105 dias	1	98,5	198,0	2,01
	2	98,0	197,5	2,01

Tabela 15 – Relação h/d dos CPs moldados com cimento CP V-ARI.

Idade do CP	Número do CP	Diâmetro do CP [mm]	Altura do CP [mm]	Relação h/d
3 dias	1	98,5	199,5	2,02
	2	98,0	198,0	2,02
7 dias	1	97,5	197,5	2,02
	2	98,0	197,5	2,01
14 dias	1	98,0	198,0	2,02
	2	98,0	198,5	2,02
28 dias	1	97,5	197,5	2,02
	2	98,0	198,5	2,02
105 dias	1	99,0	199,5	2,01
	2	98,5	197,5	2,00

Após atingirem a idade de ruptura os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão axial aos 3, 7, 14, 28 e 105 dias de idade contados a partir da data de moldagem. O equipamento utilizado para a realização do ensaio foi uma prensa

eletrohidráulica manual, seguindo as especificações da norma citada no que diz respeito à tolerância em horas para o ensaio de acordo com cada idade, mostrada na Tabela 16.

Tabela 16 – Idades de ruptura dos CPs e tolerância máxima modificada de NBR 5739 (2007).

Tipo de Cimento	Data de Moldagem	Idade de Ensaio	Data de Ruptura	Tempo Excedido (+) ou Antecedido (-)	Tolerância Permitida
CP II-F-32	29/04/2017 09:35	3 dias	02/05/2017 - 10:53	+ 1h 18min	2 horas
		7 dias	06/05/2017 - 09:22	- 0h 13min	6 horas
		14 dias	13/05/2017 - 08:38	- 0h 57min	12 horas
		28 dias	27/05/2017 - 08:31	- 1h 04min	24 horas
		105 dias	12/08/2017 - 08:51	- 0h 44min	54 horas
CP II-Z-32	29/04/2017 10:13	3 dias	02/05/2017 - 10:58	+ 0h 45min	2 horas
		7 dias	06/05/2017 - 09:28	- 0h 45min	6 horas
		14 dias	13/05/2017 - 08:44	- 1h 29min	12 horas
		28 dias	27/05/2017 - 08:36	- 1h 37min	24 horas
		105 dias	12/08/2017 - 08:59	- 1h 14min	54 horas
CP IV-32-RS	29/04/2017 10:55	3 dias	02/05/2017 - 11:02	+ 0h 07min	2 horas
		7 dias	06/05/2017 - 09:33	- 1h 22min	6 horas
		14 dias	13/05/2017 - 08:48	- 2h 07min	12 horas
		28 dias	27/05/2017 - 08:40	- 2h 15min	24 horas
		105 dias	12/08/2017 - 09:06	- 1h 49min	54 horas
CP V-ARI	29/04/2017 11:29	3 dias	02/05/2017 - 11:06	- 0h 23min	2 horas
		7 dias	06/05/2017 - 09:39	- 1h 50min	6 horas
		14 dias	13/05/2017 - 08:56	- 2h 33min	12 horas
		28 dias	27/05/2017 - 08:45	- 2h 44min	24 horas
		105 dias	12/08/2017 - 09:12	- 2h 17min	54 horas

Por conseguinte, com os valores de força máxima aplicada sobre cada corpo de prova fornecidos pela prensa, calculou-se a resistência à compressão utilizando a Equação 6.

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \quad (6)$$

Sendo:

f_c → Resistência à compressão [MPa]

F → Força máxima alcançada [N]

D → Diâmetro do corpo de prova [mm]

Os tempos mínimo e máximo para ruptura foram calculados dividindo-se a resistência à compressão (f_c) por 0,6 e 0,3, respectivamente, conforme a tolerância citada pela norma, permitindo que a velocidade fosse mantida entre 0,30 MPa/s e 0,60 MPa/s.

Os ensaios foram cronometrados e com os resultados provenientes das resistências à compressão, foram calculadas as velocidades médias de ensaio de acordo com a Equação 7, verificando se as mesmas mantiveram-se dentro do tolerável mencionado, indicadas nas Tabelas 17, 18, 19 e 20.

$$\text{Velocidade Média do Ensaio} = \frac{\text{Resistência à Compressão [MPa]}}{\text{Duração do Ensaio [s]}} \quad (7)$$

Tabela 17 – Resistência à compressão e velocidade média dos ensaios de CPs moldados com cimento CP II-F-32.

Idade do CP	Número do CP	Resistência à Compressão [MPa]	Duração do Ensaio [s]	Tempo Mínimo de Ensaio [s]	Tempo Máximo de Ensaio [s]	Velocidade Média do Ensaio [MPa/s]
3 dias	1	24,988	46,62	41	83	0,53
	2	25,245	52,47	42	84	0,48
7 dias	1	34,206	81,29	57	114	0,42
	2	32,971	58,09	54	109	0,56
14 dias	1	37,690	81,41	62	125	0,46
	2	40,455	74,00	67	134	0,54
28 dias	1	45,880	96,17	76	152	0,47
	2	45,725	99,06	76	152	0,46
105 dias	1	53,863	111,38	89	179	0,48
	2	57,570	165,93	95	191	0,35

Tabela 18 – Resistência à compressão e velocidade média dos ensaios de CPs moldados com cimento CP II-Z-32.

Idade do CP	Número do CP	Resistência à Compressão [MPa]	Duração do Ensaio [s]	Tempo Mínimo de Ensaio [s]	Tempo Máximo de Ensaio [s]	Velocidade Média do Ensaio [MPa/s]
3 dias	1	16,760	45,34	28	55	0,37
	2	16,885	53,00	28	56	0,32
7 dias	1	27,476	74,00	46	92	0,37
	2	27,991	56,90	46	93	0,49
14 dias	1	36,554	83,71	60	121	0,44
	2	34,765	68,22	57	115	0,51
28 dias	1	40,410	68,43	67	134	0,59
	2	39,990	81,69	66	133	0,49

...continua

105 dias	1	51,835	86,60	86	172	0,59
	2	50,831	100,38	84	169	0,50

Tabela 19 – Resistência à compressão e velocidade média dos ensaios de CPs moldados com cimento CP IV-32-RS.

Idade do CP	Número do CP	Resistência à Compressão [MPa]	Duração do Ensaio [s]	Tempo Mínimo de Ensaio [s]	Tempo Máximo de Ensaio [s]	Velocidade Média do Ensaio [MPa/s]
3 dias	1	13,716	37,71	22,00	45	0,36
	2	14,422	51,91	24,00	48	0,34
7 dias	1	24,864	59,34	41,00	82	0,42
	2	22,726	50,38	37,00	75	0,45
14 dias	1	29,664	52,19	37,00	75	0,43
	2	33,790	69,88	56,00	112	0,48
28 dias	1	42,070	70,52	70,00	140	0,59
	2	38,209	64,84	63,00	127	0,58
105 dias	1	49,714	85,44	82,00	165	0,58
	2	46,232	82,78	77,00	154	0,56

Tabela 20 – Resistência à compressão e velocidade média dos ensaios de CPs moldados com cimento CP V-ARI.

Idade do CP	Número do CP	Resistência à Compressão [MPa]	Duração do Ensaio [s]	Tempo Mínimo de Ensaio [s]	Tempo Máximo de Ensaio [s]	Velocidade Média do Ensaio [MPa/s]
3 dias	1	37,823	77,87	63	126	0,48
	2	39,120	97,34	65	130	0,40
7 dias	1	44,238	73,93	73	147	0,59
	2	46,830	83,03	78	156	0,56
14 dias	1	47,935	79,29	79	159	0,60
	2	51,276	110,85	85	170	0,46
28 dias	1	57,688	97,41	96	192	0,59
	2	53,863	93,94	89	179	0,57
105 dias	1	58,743	114,00	97	195	0,51
	2	60,255	167,84	100	200	0,36

A Figura 36 apresenta os resultados dos ensaios de compressão axial do concreto separados por tipos de cimento, calculando-se as médias de resistência à compressão entre os dois corpos de prova de mesma idade. Como método comparativo, a Figura 37 expõe a variação percentual das resistências à compressão axial entre 3 e 105 dias.

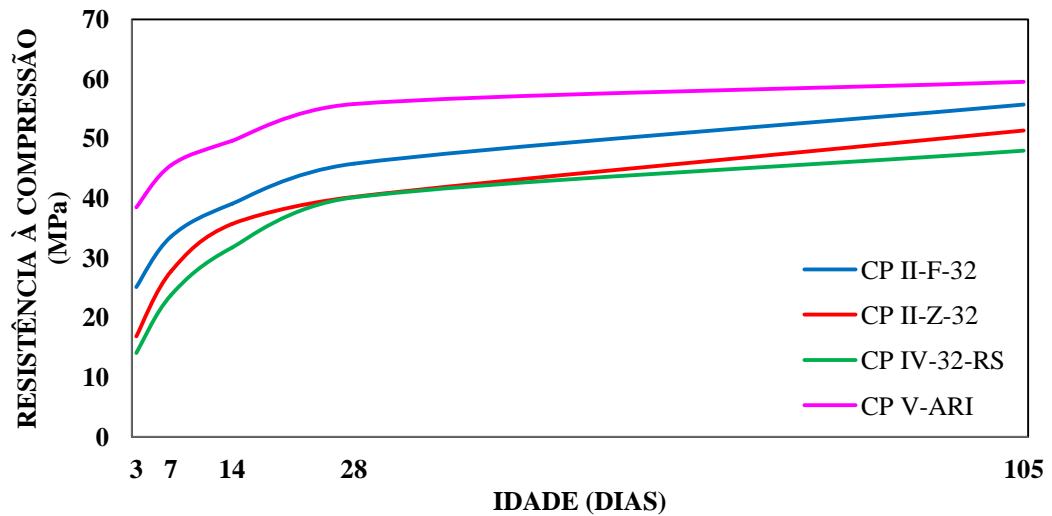


Figura 36 – Resistência média à compressão do concreto para cada tipo de cimento.

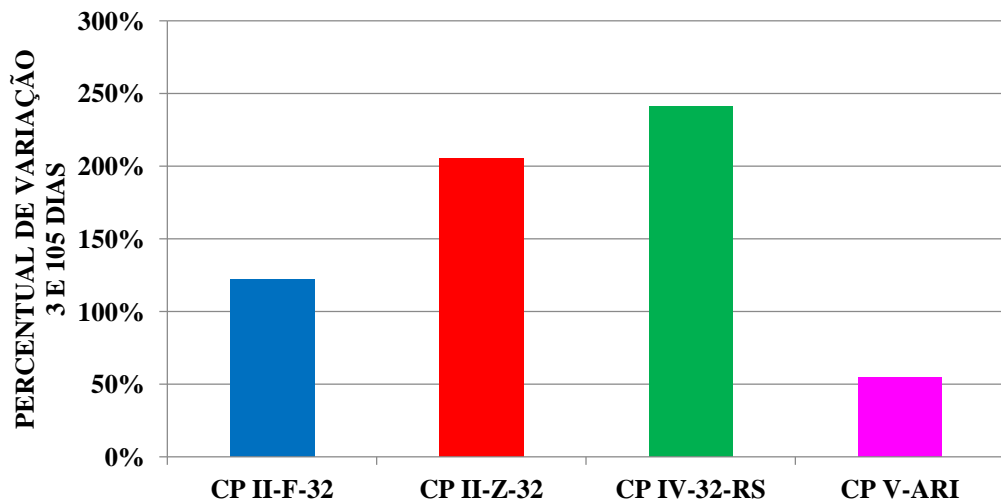


Figura 37 – Variação percentual da resistência média à compressão obtida entre 3 e 105 dias.

Analisando os dados obtidos, nota-se que o tipo de cimento tem influência direta na resistência mecânica do concreto, determinados pelos principais componentes presentes em cada tipo. Quando comparados, foi possível observar que aqueles com cimentos de composição mais pura, isto é, sem muitas adições, têm maior valor de resistência em todas as idades, como é o caso do CP V-ARI e CP II-F-32. O cimento CP V-ARI, cuja principal característica é o alto ganho de resistência inicial, obteve resultados satisfatórios, atingindo valores médios de 38,472 MPa a 59,499 MPa entre 3 e 105 dias, aumentando assim 55% de sua resistência à compressão ao longo da idade. Isso se dá pelo fato de que em sua composição apresenta 95% a 100% de clínquer e gesso, causando um endurecimento acelerado.

Outro tipo de cimento cuja composição se assemelha ao tipo mencionado é o CP II-F-32, tendo como diferencial um acréscimo no material carbonático chamado de fíler, conseqüentemente obtendo resultados análogos, alcançando resistência inicial aos 3 dias de 25,117 MPa e final aos 105 dias de 55,716 MPa, crescendo 122%.

Já os concretos que continham cimento com maiores teores de adições, como o CP IV-32-RS e CP II-Z-32, obtiveram valores de resistência à compressão menor que os outros dois supracitados. Ambos contêm pozolana em sua composição, sobretudo o cimento CP IV-32-RS, que pelo fato de incluir este elemento, tem seu tempo de pega mais longo, impedindo que a resistência inicial seja alta. Entretanto conforme a idade dos CPs moldados com este cimento avança, sua resistência evolui, obtendo o maior ganho percentual entre 3 e 105 dias, atingindo 241% referentes a resistência à compressão aos 3 dias de 14,069 MPa e 105 dias de 47,793 MPa.

Com o cimento CP II-Z-32 também era esperado que tivesse resultados similares ao anterior, uma vez que a composição de ambos era mais próxima que os demais, comprovado pela resistência inicial aos 3 dias de 16,823 MPa e final de 51,333 MPa aos 105 dias, com variação de 205%.

Embora cada concreto tenha obtido valores distintos, todos apresentaram aos 28 dias a resistência à compressão mínima desejada de 36,6 MPa, referente ao traço calculado. Classificando-os em ordem crescente de valores de resistência à compressão aos 28 dias, tem-se CP IV-32-RS (40,140 MPa), CP II-Z-32 (40,200 MPa), CP II-F-32 (45,803 MPa) e CP V-ARI (55,776 MPa).

Os resultados obtidos, quando comparados aos estudos feitos por outros autores, como Paiva; Oliveira (2009), Medeiros-Junior *et al.* (2014) e ABCP (2012), demonstrados pelas Figuras 38, 39, 40 e 41 comprovam que os resultados assemelharam-se em determinados aspectos de acordo com o tipo de cimento utilizado.

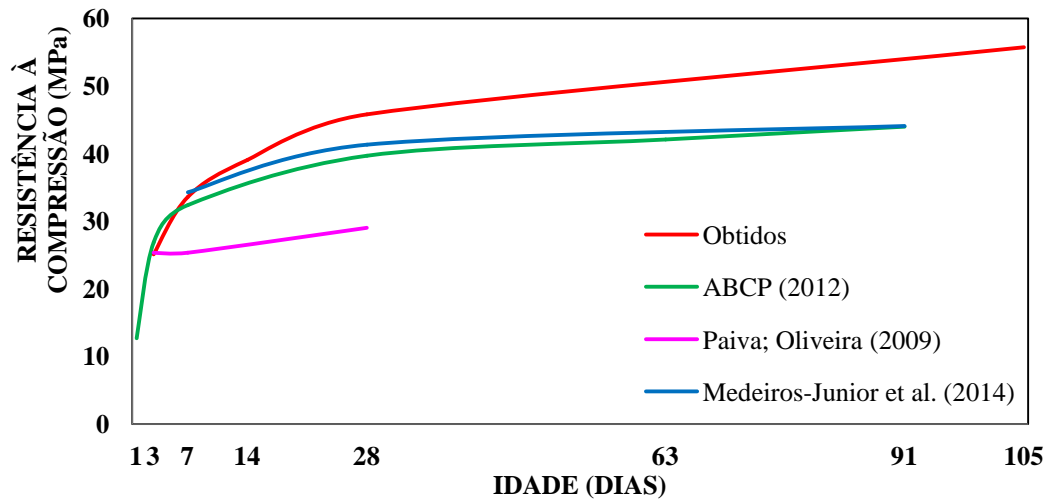


Figura 38 – Resistência à compressão obtida do concreto com cimento CP II-F comparado com outros autores.

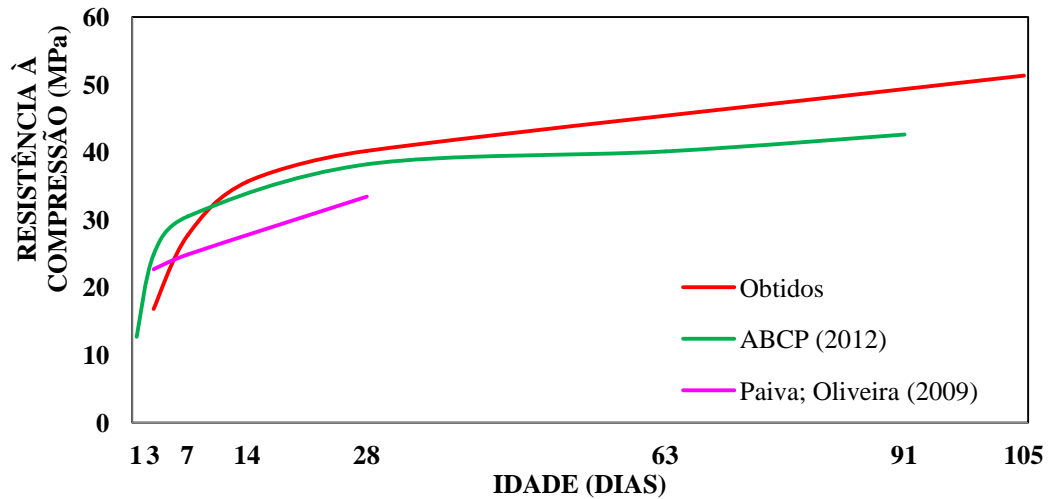


Figura 39 – Resistência à compressão obtida do concreto com cimento CP II-Z comparado com outros autores.

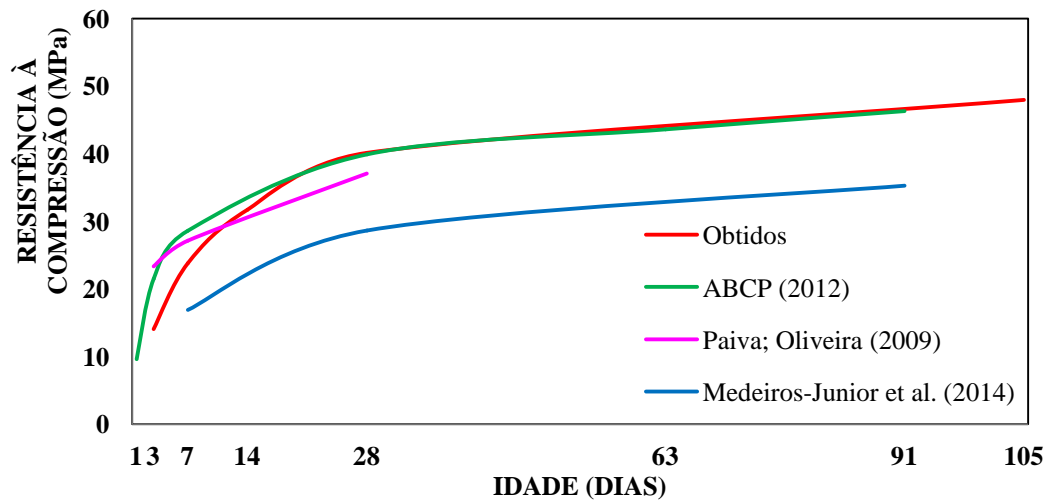


Figura 40 – Resistência à compressão obtida do concreto com cimento CP IV comparado com outros autores.

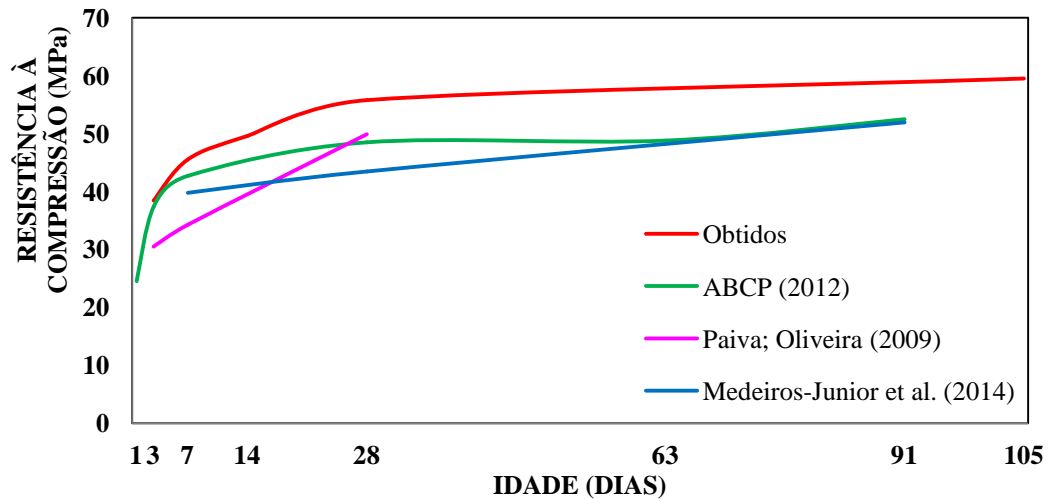


Figura 41 – Resistência à compressão obtida do concreto com cimento CP V-ARI comparado com outros autores.

Todos os resultados obtidos apresentaram coerência aos demais comparados, ratificando os parâmetros analisados. Como é possível observar nas Figuras 38, 39 e 41, as resistências à compressão obtidas além de ter alcançado resistências superiores, também se aproximaram àquelas dos trabalhos correlatos. Já na Figura 40, observa-se que houve uma diferença tênue entre os resultados obtidos neste estudo e o alcançado pela ABCP (2012), atribuindo maior confiabilidade aos procedimentos utilizados neste trabalho.

A análise seguinte ao ensaio de compressão axial foi o estudo dos tipos de ruptura dos corpos de prova, conforme o Anexo A da NBR 5739 (2007), demonstrados na Tabela 21.

Tabela 21 – Tipos de ruptura apresentados nos corpos de prova.

Idade do Ensaio	CP II-F-32		CP II-Z-32		CP IV-32-RS		CP V-ARI	
	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2
3 dias	F	F	D	G	D	E	C	E
7 dias	F	F	F	F	D	D	F	E
14 dias	D	F	D	D	A	D	E	E
28 dias	F	B	D	A	D	B	B	D
105 dias	F	C	F	D	G	E	D	D

Para a classificação do tipo de ruptura foi realizado um comparativo dos corpos de prova rompidos com o que ilustra a norma NBR 5739 (2007) de acordo com as Figuras 42, 43, 44, 45, 46, 47 e 48.

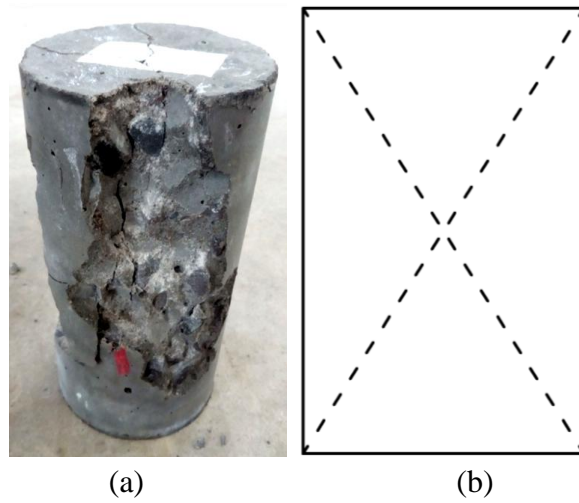


Figura 42 – Corpo de prova classificado como tipo A, ruptura cônica: a) CP rompido; b) Ilustração segundo Anexo A da NBR 5739 (2007).

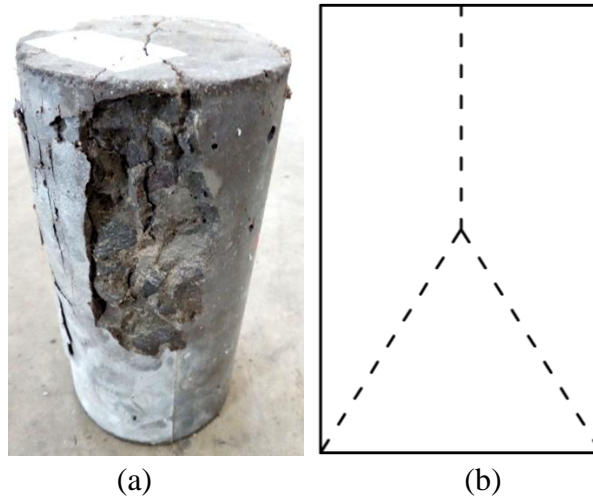


Figura 43 – Corpo de prova classificado como tipo B, ruptura bipartida: a) CP rompido; b) Ilustração segundo Anexo A da NBR 5739 (2007).

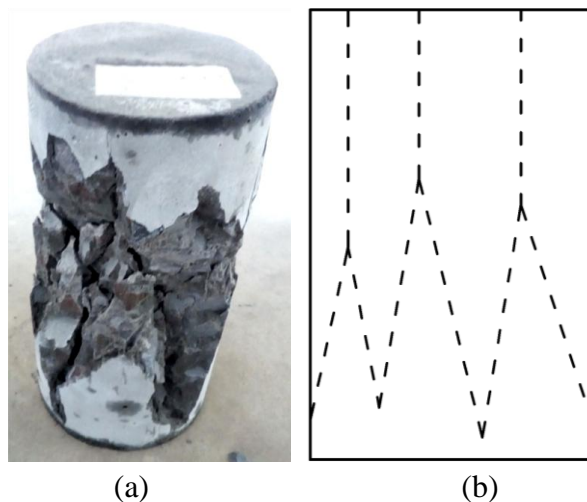


Figura 44 – Corpo de prova classificado como tipo C, ruptura colunar: a) CP rompido; b) Ilustração segundo Anexo A da NBR 5739 (2007).

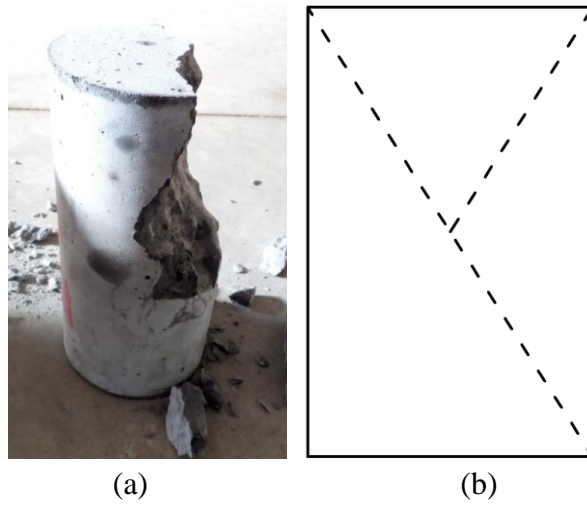


Figura 45 – Corpo de prova classificado como tipo D, ruptura cônica e cisalhada: a) CP rompido; b) Ilustração segundo Anexo A da NBR 5739 (2007).

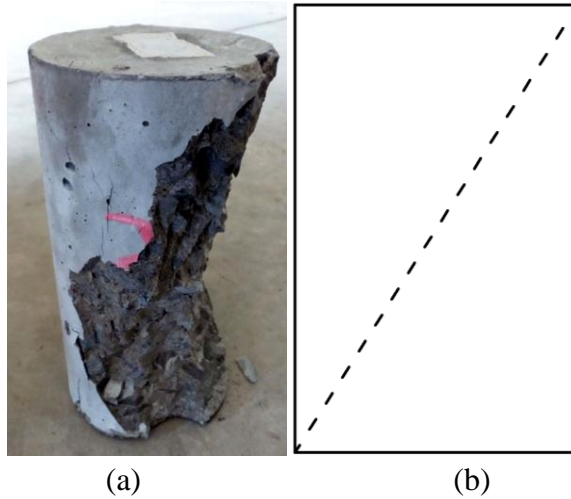


Figura 46 – Corpo de prova classificado como tipo E, ruptura cisalhada: a) CP rompido; b) Ilustração segundo Anexo A da NBR 5739 (2007).

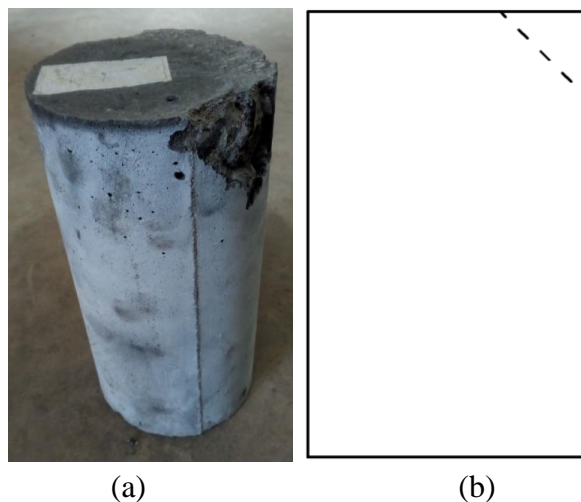


Figura 47 – Corpo de prova classificado como tipo F, ruptura no topo: a) CP rompido; b) Ilustração segundo Anexo A da NBR 5739 (2007).

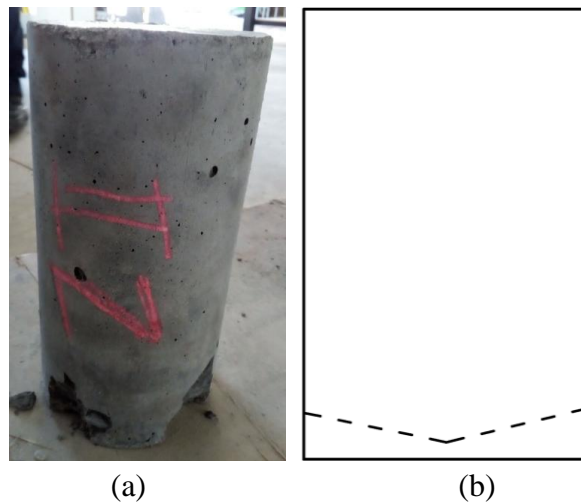


Figura 48 – Corpo de prova classificado como tipo G, rupturas próximas à base: a) CP rompido; b) Ilustração segundo Anexo A da NBR 5739 (2007).

Quando se tem uma variação de resistência à compressão significativa, apesar de opcional, é conveniente investigar o tipo de ruptura dos corpos de prova, pois irregularidades no topo/base, além de erros na moldagem, podem ser evidenciados e solucionados.

A avaliação de desempenho do ensaio de compressão axial do concreto foi realizada por método estatístico conforme o Anexo B da NBR 5739 (2007), resultando no coeficiente de variação do ensaio (CV_e) que é determinado conforme o procedimento descrito a seguir. Inicialmente obteve-se a estimativa do desvio padrão (S_e), calculado pela Equação 8.

$$S_e = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{d_2 \times n} \quad (8)$$

Onde:

$d_2 \rightarrow$ Constante fornecida pela norma supracitada, utilizando o valor igual a 1,128 para dois corpos de prova rompidos.

O coeficiente de variação do ensaio (CV_e) é a razão entre a estimativa de desvio padrão (S_e) e a resistência média à compressão dos corpos de prova (f_{cm}), exemplificada na Equação 9.

$$cv_e = \frac{S_e}{f_{cm}} \quad (9)$$

Com este resultado foi possível classificar a qualidade da prática dos ensaios conforme a Tabela 22.

Tabela 22 - Coeficiente de variação do ensaio segundo NBR 5739 (2007).

Nível 1 (Excelente)	Nível 2 (Muito Bom)	Nível 3 (Bom)	Nível 4 (Razoável)	Nível 5 (Deficiente)
$CVe \leq 3,0\%$	$3,0\% < CVe \leq 4,0\%$	$4,0\% < CVe \leq 5,0\%$	$5,0\% < CVe \leq 6,0\%$	$CVe > 6,0\%$

De acordo com a Tabela 23, onde são demonstrados os resultados das resistências à compressão dos corpos de prova aos 28 dias, observa-se também os resultados dos coeficientes de variação do ensaio destes CPs.

Tabela 23 – Resistência à compressão aos 28 dias e coeficiente de variação do ensaio.

Tipo de Cimento	CP II-F-32		CP II-Z-32		CP IV-32-RS		CP V-ARI	
Corpo de Prova	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2
Resistência à Compressão [MPa]	45,880	45,725	40,410	39,990	42,070	38,209	57,688	53,863
f_{cm} [MPa]	45,803		40,200		40,140		55,776	
S_e [MPa]	0,069		0,186		1,711		1,695	
CVe [%]	0,15		0,46		4,26		3,04	
Classificação	Excelente		Excelente		Bom		Muito Bom	

De acordo com os coeficientes de variação do ensaio obtidos dentro da classificação entre bom e excelente, os parâmetros utilizados neste estudo apresentaram poucos desvios, garantindo assim maior confiança nos resultados apresentados.

Foi calculada a resistência característica de cada um dos tipos analisados a fim de verificar as classes de resistência de cada tipo.

Com os valores de f_{cm} já calculados, utiliza-se a Equação 10 do desvio padrão (S_d), para determinar o valor a ser considerado como resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), de acordo com a Equação 11.

$$S_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{cm})^2} \quad (10)$$

Onde:

n → Número de corpos de prova rompidos.

f_i → Resistência à compressão de cada corpo de prova.

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65 \times S_d \quad (11)$$

Com os dados apresentados na Tabela 24, é possível classificar a resistência dos concretos obtidos de acordo com os parâmetros descritos na NBR 8953 (2015).

Tabela 24 – Resistência à compressão característica dos concretos.

Tipo de Cimento	CP II-F-32	CP II-Z-32	CP IV-32-RS	CP V-ARI
f_{cm} [MPa]	45,803	40,200	40,140	55,776
S_d [MPa]	0,110	0,297	2,730	2,705
f_{ck} [MPa]	45,622	39,710	35,635	51,323
Classe de Resistência	C45	C35	C35	C50

Conforme a Tabela 24, todos os concretos obtiveram classificação de resistências acima de C30, calculada no traço, demonstrando assim o alto desempenho dos cimentos e eficiência do método utilizado.

7. CONCLUSÕES

A análise dos resultados corroborou para o desenvolvimento do conhecimento técnico com enfoque na diversidade dos cimentos disponibilizados no mercado, principalmente dos cimentos CP II-F-32, CP II-Z-32, CP IV-32-RS e CP V-ARI.

Com relação à composição do cimento, a variação dos percentuais de clínquer (componente principal) e de adições, age intrinsecamente no comportamento do concreto fresco e endurecido, seja na consistência ou na resistência à compressão, assemelhando-se aos resultados de ensaio dos respectivos tipos de cimento utilizados.

A finura do cimento interfere na consistência do concreto fresco, como é possível verificar nos ensaios de abatimento de tronco de cone realizados. Quanto maior a finura, menor a trabalhabilidade, uma vez que sua área específica é maior. Além disso, durante a reação de hidratação, a finura propicia o início de pega em menor tempo. No concreto endurecido, por sua vez, é reduzido o índice de vazios e consequentemente a permeabilidade.

Quanto à utilização dos agregados, é importante a uniformidade da granulometria, principalmente do agregado graúdo, pois o alojamento dos grãos menores no concreto fresco aumenta seu abatimento no *slump test*.

Aproximadamente 75% dos resultados do ensaio de consistência do concreto apresentaram divergências em relação aos esperados, visto que os abatimentos obtidos foram maiores que o de projeto, podendo ser justificados à finura dos cimentos e à granulometria do agregado graúdo. Não obstante a isso, a resistência à compressão dos corpos de prova mantiveram-se acima do mínimo projetado de $f_{cm} = f_{c28} = 36,6$ MPa. Pode-se afirmar que a resistência à compressão do concreto não sofre alteração caso o abatimento não seja o de projeto, desde que sejam respeitadas a relação água/cimento e as massas dos agregados.

Os concretos apresentaram resistência característica aos 28 dias de 35,635 MPa, 39,710 MPa, 45,622 MPa e 51,323 MPa enquadrando-se nas classes de resistência C35, C35, C45 e C50, respectivamente para os cimentos CP IV-32-RS, CP II-Z-32, CP II F-32 e CP V-ARI.

Conforme avaliação da resistência média à compressão aos 28 dias os valores crescentes são de 40,140 MPa (CP IV-32-RS), 40,200 MPa (CP II-Z-32), 45,803 MPa (CP II F-32) e 55,776 MPa (CP V-ARI). O CP IV-32-RS, apesar do maior percentual no

ganho de resistência média entre 3 e 105 dias, apresentou menor resistência devido à maior porcentagem de pozolana como adição no clínquer. Por outro lado, o cimento CP V-ARI obteve resultados opostos ao CP IV-32-RS. Devido à alta resistência inicial, seu percentual no ganho de resistência à compressão foi o mais baixo, e obteve resistência média à compressão maior que os demais, já que em sua composição há baixo teor de adições, garantindo maior pureza ao cimento. Por sua vez, os cimentos CP II-Z-32 e CP II-F-32 tiveram resistências média à compressão intermediárias quando comparados aos demais, sendo justificadas principalmente pela grande quantidade de material pozolânico e carbonático no primeiro, e apenas materiais carbonáticos no segundo.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Estudo do tempo de início e fim de pega em concretos utilizando cimentos distintos.
- ✓ Influência do uso de aditivos plastificantes frente à resistência à compressão de concreto confeccionado com os cimentos disponíveis no mercado.
- ✓ Interferência do tipo de capeamento na distribuição de carregamento originando rupturas classificadas de acordo com o Anexo A da NBR 5739 (2007).
- ✓ Suscetibilidade a patologias em concretos elaborados a partir dos cimentos CP II-F, CP II-Z, CP IV e CP V-ARI.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIZADEH, R. **Cement and Art**. Ottawa: Institute for Research in Construction. Disponível em: <<http://www.cementlab.com/cement-art.htm>>. Acesso em 17 ago. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1231 / C1231M-15**: Standard practice for use of unbonded caps in determination of compressive strength of hardened concrete cylinders. West Conshohocken, 2000. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7. ed. São Paulo, 2002. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 8. ed. São Paulo, 2012. 40 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821**: Preparação de concreto em laboratório - Procedimento. Rio de Janeiro, 2009. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

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. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33: Concreto - Amostragem de concreto fresco**. Rio de Janeiro, 1998. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

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, 2010. 20 p.

BATTAGIN, A. F. **Uma breve história do cimento Portland | PORTAL ABCP**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>>. Acesso em: 12 jul. 2017.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 488 p.

CORSINI, R. Ambientes Agressivos. **Téchne**, São Paulo, n. 196, jul. 2013. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/196/artigo294033-2.aspx>>. Acesso em: 02 ago. 2017.

JERONYMO, V. **Conflitos, impasses e limites na preservação do patrimônio industrial paulista: o caso da Perus (CBCPP)**. 2016. Tese (Doutorado em Teoria e História da Arquitetura e do Urbanismo) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos.

MEDEIROS, H. **Cimentos | Equipe de Obra**. Disponível em: <<http://equipedebra.pini.com.br/construcao-reforma/34/cimentos-conheca-os-produtos-mais-adequados-as-caracteristicas-e-211891-1.aspx>>. Acesso em: 16 mar. 2017.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista Alconpat**, Yucatán, v. 4, n. 2, p. 113-128, ago. 2014.

MENEZES, A. J. R. **Estudo comparativo entre capeamento de corpo-de-prova de concreto com enxofre, uso de neoprene e retificação de topo para ensaio de resistência à compressão axial**. Fortaleza: UFC, 2011.

MME, Ministério de Minas e Energia. **Relatório N°30: Perfil de brita para construção civil**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P22_RT30_Perfil_de_brita_para_construcao_civil.pdf/01c75ac7-ecd2-4d85-a127-3ecddec2a31>. Acesso em: 11 set. 2017.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

PAIVA, C. E. L.; OLIVEIRA, P. C. A. **Reciclagem de pavimentos: Estudo da influência do tipo de cimento Portland na resistência a compressão simples do material reciclado**. In: Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, 4, 2009, Fortaleza-CE.

PINI. Cimento Portland. **Construção Mercado**, São Paulo, n. 28, nov. 2003. Disponível em: <<http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/28/cimento-portland-281728-1.aspx>>. Acesso em: 11 jul. 2017.

SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **História do Cimento no Brasil**. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/Historia_do_Cimento_no_Brasil.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2017.

VOTORANTIM, Cimentos. **Traço de concreto: a importância do cimento - Inovação - Mapa da Obra**. Disponível em: <<http://www.mapadaobra.com.br/inovacao/traco-de-concreto-a-importancia-do-cimento>>. Acesso em: 25 jul. 2017.