

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

PAULO VICTOR CAMPOS GUIMARÃES

**ESTUDO DA ADERÊNCIA DE CONCRETOS ATIVADOS ALCALINAMENTE À
BASE DE CINZA DA CASCA DE ARROZ E METACULIM.**

Ilha Solteira
2019

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PAULO VICTOR CAMPOS GUIMARÃES

**ESTUDO DA ADERÊNCIA DE CONCRETOS ATIVADOS
ALCALINAMENTE À BASE DE CINZA DA CASCA DE ARROZ E
METACAULIM.**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Pinheiro Melges

FICHA CATALOGRÁFICA

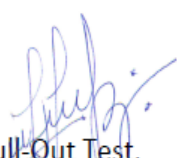
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G963e Guimarães, Paulo Victor Campos.
Estudo da aderência de concretos ativados alcalinamente à base de cinza da casca de arroz e metacaulim / Paulo Victor Campos Guimarães. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
151 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2019

Orientador: José Luiz Pinheiro Melges
Inclui bibliografia

1. Geopolímeros. 2. Materiais alternativos. 3. Pull-Out Test.


João José Barbosa
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDO DA ADERÊNCIA DE CONCRETOS ATIVADOS ALCALINAMENTE
À BASE DE CINZA DA CASCA DE ARROZ E METACÁULIM

AUTOR: PAULO VICTOR CAMPOS GUIMARÃES

ORIENTADOR: JOSE LUIZ PINHEIRO MELGES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA CIVIL,
área: Estruturas pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JOSE LUIZ PINHEIRO MELGES
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JOÃO CLAUDIO BASSAN DE MORAES
/ Instituto Tecnológico de Aeronáutica



Prof. Dr. GUILHERME ARIS PARSEKIAN
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de
Tecnologia

Ilha Solteira, 21 de maio de 2019

DEDICO

Aos meus pais e meus ídolos **Andreia Campos** e **Knymon Waston**, por sempre estarem comigo.

AGRADECIMENTOS

Diante de mais um trabalho desenvolvido pela UNESP de Ilha Solteira, tenho muitos agradecimentos a fazer. Meus pais, Andreia Campos e Knymon Waston, sempre depositaram uma enorme crença em mim. Obrigado por entender minhas dificuldades e ainda assim acreditar que posso um dia vir a alcançar meus anseios. Minha motivação vem deles, sem dúvida.

Sou grato à equipe do MAC, tanto aos docentes José Luiz Pinheiro Melges, Jorge Luís Akasaki e Mauro Mitsuuchi Tashima pelos inúmeros ensinamentos, quanto aos colegas graduandos e pós-graduandos; ao docente Rogério de Oliveira Rodrigues por ter despertado interesse em outras áreas de pesquisa; aos técnicos do laboratório de Engenharia Civil, Gilson e Flávio, que sempre se mostraram disponíveis conforme os anseios do trabalho; ao seu Ademar, pelo café diário e as histórias de vida.

Pelo desenvolvimento da pesquisa com notável aprendizado, deixo um enorme agradecimento ao professor José Luiz Pinheiro Melges, por ter se prontificado como meu orientador não só durante a graduação mas também durante o mestrado. Sua disponibilidade e predisposição me mantiveram confiante em relação aos resultados que poderíamos atingir. Obrigado também por me confiar uma disciplina na graduação, professor. Acredito que cresci imensamente lidando com essa experiência.

Aos meus amigos e companheiros de minha segunda passagem por Ilha Solteira, obrigado pela convivência. Aos amigos que fiz durante a graduação e que também estavam comigo durante o mestrado, Mauricio, Guilherme, Pedro e José Antônio, agradeço pela camaradagem nesses últimos dois anos. Aos companheiros que fiz durante o mestrado, Marcelo, Felipe e Rodrigo, quero agradecer pelo suporte na parte prática do trabalho, além do meu grande amigo Guilherme, que também me auxiliou na pesquisa e esteve presente comigo no NEPAE ao longo dos trabalhos. Ao colegas Danilo e Tainara reservo também meu agradecimento pela ajuda direcionada ao trabalho.

Gostaria de expressar minha gratidão aos meus alunos da disciplina de Teoria das Estruturas no ano de 2018. Foram muitos aprendizados que adquiri durante a atividade de docência. E diante de minha inexperiência, creio que a compreensão e a paciência dos discentes tenham sido essenciais. Quero desejar muita sorte e prosperidade àqueles que tiveram seus caminhos cruzando com o meu. Espero ter ajudado ou contribuído de alguma forma.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

A indústria do cimento Portland é responsável direta por uma carga de poluentes de significativo dano ambiental. Os Concretos Ativados Alcalinamente (CAA) são matrizes compostas por um ativador alcalino e um aglomerante alternativo. O material comumente utilizado para a ativação alcalina é o silicato de sódio, cuja fabricação também se mostra como ambientalmente nociva. O silicato de sódio, junto ao cimento Portland, podem ser dispensados, uma vez que a produção do ativador pode se dar através de um composto rico em silício (materiais pozolânicos no geral), sendo a cinza da casca de arroz (CCA) o instrumento de estudo do trabalho apresentado, e a soda cáustica como fornecedora de sódio (meio alcalino). Os concretos CAA foram definidos conforme o parâmetro ξ (CAA- ξ), que representa a relação molar entre SiO_2 e Na_2O , com as variações $\xi = 1,2$, $\xi = 1,6$ e $\xi = 2,0$, esta última representando o concreto ativado alcalinamente com maior taxa de CCA. Este trabalho tem como intuito a avaliação das propriedades mecânicas dos concretos CAA, comparando-as, em seguida, com duas tipologias de concreto com cimento Portland CPV-ARI, com distintos fatores água cimento (0,45 e 0,55). A variação na relação a/c teve como intuito a análise de duas referências com valores diferentes de f_{ck} . Os resultados demonstram que a resistência à compressão axial e diametral (sete dias de cura) para os concretos CAA se encontraram na faixa de 25 a 30 MPa, e de 1,5 a 3,5 MPa, respectivamente. Não foram observados ganhos expressivos na transição entre as idades de 7 e 28 dias, e 28 e 90 dias. Os concretos convencionais utilizados como referência atingiram resistência à compressão axial na faixa de 30 a 40 MPa, e diametral de cerca de 5 MPa, aos sete dias, apresentando um ganho significativo aos 28 e 90 dias idade. Os módulos de elasticidade dos concretos CAA resultaram valores entre 10 e 20 GPa. Já os concretos convencionais evidenciaram valores do módulo de elasticidade superiores a 25 GPa, já em idades mais curtas. Com relação à aderência, existe um distanciamento do concreto com fator água/cimento 0,45 em relação aos ativados alcalinamente, resultado este também evidenciado nas demais propriedades estudadas. Entretanto, a descrição da curva de arrancamento é similar para os dois grandes grupos trabalhados, em especial no pareamento entre as amostras CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55, aquela sendo a de maior eficiência dentre as tipologias alternativas. Os concretos alternativos evidenciaram ganhos baixos para a tensão de aderência média nas transições entre as idades de 7, 28 e 90 dias, de modo que houve o alcance de 12,61 MPa (5mm) e 17,29 MPa (8mm) aos 90 dias para a amostra CAA-2,0. Observaram-se ganhos mais expressivos na transição das idades para as amostras de cimento Portland, de maneira que aos 90 dias as tensões de aderência médias observadas para o CPV-ARI 0,55 foram de 10,18 MPa (5mm) e 18,16 MPa (8mm). Contudo, uma clara proximidade para com a amostra CAA-2,0 foi evidenciada. Considerando a característica de sustentabilidade inerente aos concretos CAA, tais alternativas se mostram promissoras, uma vez que dadas todas as propriedades mecânicas levantadas, os concretos ativados alcalinamente trazem um comportamento mecânico eficiente, com possível aplicação em múltiplas atividades na construção civil.

Palavras-chave: Geopolímeros. Materiais alternativos. Pull-out test.

ABSTRACT

The Portland cement industry is directly responsible for a load of pollutants of significant environmental damage. Alkali-Activated Concrete (AAC) is a matrix with prior activation and alternative binder. The catalyst material commonly used for prior activation is the sodium silicate, the manufacture of which is also environmentally harmful. Sodium silicate, together with Portland cement, can also be dispensed with, since the activator can be produced through a silicon-rich compound (pozzolanic materials in general), with the rice husk ash (RHA) being the instrument of study of the work presented, and caustic soda as a supplier of sodium. The AAC concretes were defined according to the parameter ξ (AAC- ξ), which represents the molar ratio of SiO_2 and Na_2O , with the variations $\xi = 1.2$, $\xi = 1.6$ and $\xi = 2.0$, the latter representing the AAC with higher RHA rate. This work intends to evaluate the mechanical properties of AAC, comparing them to two types of concrete with ordinary Portland cement with high early resistance, with different water cement factors (0.44 and 0.55). The variation in the water/binder mass ratio was intended to analyze two references with different values of compressive strength class. The results demonstrate that the axial and diametric compression strength (seven days cure) for the AAC concretes were in the range of 25 to 30 MPa, and of 1.5 to 3.5 MPa, respectively. There were no significant gains in the transition between the ages of 7 and 28 days, and 28 and 90 days. The conventional concretes used as reference reached resistance to axial compression in the range of 30 to 40 MPa, and diametric of about 5 MPa at seven days, presenting a significant gain at 28 and 90 days old. The modulus of elasticity of AAC resulted in values between 10 and 20 GPa, while the conventional concretes showed modulus of elasticity values higher than 25 GPa, at shorter ages. Regarding the adhesion, there is a distancing between the OPC concrete with a water/cement ratio of 0.45 and the alkali-activated ones. This result is also evident in the other properties studied. However, the description of the pullout curve is similar for the two main groups (alternative and reference), especially in the matching between the AAC-2.0 and OPC 0.55 samples, the first being the one with the highest efficiency among the alternative samples. The alternative concretes highlighted low gains for medium bond strength at the transitions between the ages of 7, 28 and 90 days. Hence, it was verified a range of 12.61 MPa (5mm) and 17.29 MPa (8mm) at 90 days for the AAC-2.0 type. More significant gains were observed amongst age transition for Portland cement samples, as of 90 days of test the medium bond strength observed for OPC 0.55 were 10.18 MPa (5mm) and 18.16 MPa (8mm). Yet, a clear proximity to the AAC-2.0 sample was evident. Considering the sustainability display inherent to AAC concretes, such alternatives are promising, given all the mechanical properties raised. The alkali-activated concretes bring a mechanical display of high behavior and can be applied to many construction purposes.

Keywords: Geopolymers. Alternative materials. Pull-out test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Etapas da fabricação do cimento.....	18
Figura 2	– Etapas da ativação alcalina.....	23
Figura 3	– DRX para a cinza da cascas de arroz (CCA).....	26
Figura 4	– Evolução da resistência à compressão.....	31
Figura 5	– Curvas de arrancamento para concreto geopolimérico submetido a diferentes temperaturas.....	33
Figura 6	– Padrões de falhas na interface concreto/aço.....	34
Figura 7	– Falha típica de escorregamento – colapso do concreto.....	35
Figura 8	– Relação tensão x deformação do concreto.....	37
Figura 9	– Curvas tensão x deformação típicas para concreto de resistência até 85 MPa.....	38
Figura 10	– Resistência de dosagem.....	40
Figura 11	– Curvas da resistência de dosagem e fator a/c; cimento CP-32.....	41
Figura 12	– Determinação do teor de argamassa ideal.....	42
Figura 13	– Traços tabelados em função dos teores de argamassa.....	43
Figura 14	– Exemplo de curvas de dosagem.....	44
Figura 15	– Microfissuração do concreto na interface concreto/aço.....	47
Figura 16	– Aderência por adesão.....	48
Figura 17	– Aderência por atrito.....	49
Figura 18	– Rugosidade das barras lisas.....	49
Figura 19	– Fatores que influenciam no comportamento de aderência.....	50
Figura 20	– Curvas de aderência – barras lisas e nervuradas.....	52
Figura 21	– Ensaio de Arrancamento PULL-OUT TEST.....	53
Figura 22	– Ensaio de Flexão BEAM-TEST.....	54
Figura 23	– Ensaio de Flexão BEAM END TEST.....	55
Figura 24	– Ensaio de Tirante.....	56
Figura 25	– Ensaio das quatro barras.....	57
Figura 26	– Ensaio de granulometria da areia media natural.....	61
Figura 27	– Curva granulométrica da areia média natural.....	62
Figura 28	– Ensaio de granulometria da brita 1.....	63
Figura 29	– Curva granulométrica da brita 1.....	64
Figura 30	– Fluxograma das etapas do trabalho.....	66
Figura 31	– Corpo de prova instrumentado para medição do módulo de elasticidade.....	76
Figura 32	– Comprimento de aderência padronizado.....	78
Figura 33	– Representação do corpo de prova para arrancamento na prensa EMIC.....	79
Figura 34	– Representação do corpo de prova para arrancamento e o medidor de deformações.....	80
Figura 35	– Tensão de aderência entre o vergalhão de aço e o concreto.....	81
Figura 36	– Posicionamento da barra de aço para ensaio de tração na prensa EMIC.....	82
Figura 37	– Canais do sistema de aquisição de dados.....	83
Figura 38	– Canais do sistema de aquisição de dados e janela principal.....	84
Figura 39	– Teste ANOVA (único fator) – Microsoft Excel.....	85
Figura 40	– Teste TUKEY (único fator) – Software Past.....	85
Figura 41	– Curva tensão x deformação (barra de 5 milímetros).....	87
Figura 42	– Comparativo das curvas tensão x deformação (barra de 8 e 5 milímetros).....	88
Figura 43	– Evolução da resistência à compressão axial dos concretos.....	91

Figura 44 – Curvas que melhor representam a evolução da resistência à compressão axial dos concretos.....	92
Figura 45 – Evolução da resistência à compressão axial dos concretos – 7, 28 e 90 dias.....	93
Figura 46 – Evolução do módulo de elasticidade dos concretos.....	97
Figura 47 – Curvas que melhor representam a evolução do módulo de elasticidade dos concretos.....	98
Figura 48 – Resistência à tração por compressão diametral (MPa).....	99
Figura 49 – Resistência à tração por compressão diametral (MPa).....	104
Figura 50 – Corpos de prova após o ensaio de arrancamento.....	107
Figura 51 – Modo de ruptura do ensaio - CP's pós arrancamento.....	108
Figura 52 – Curva força de arrancamento por escorregamento da barra de aço; três amostras de concreto CPV-ARI 0,45, aos sete dias, com diâmetro da barras de 5 mm.....	109
Figura 53 – Curva força de arrancamento por escorregamento da barra de aço; concreto CPV-ARI 0,45.....	110
Figura 54 – Curva força de arrancamento por escorregamento da barra de aço; concreto CPV-ARI 0,55.....	111
Figura 55 – Curva força de arrancamento por escorregamento da barra de aço; concreto CAA-1,2.....	112
Figura 56 – Curva força de arrancamento por escorregamento da barra de aço; concreto CAA-1,6.....	114
Figura 57 – Curva força de arrancamento por escorregamento da barra de aço; concreto CAA-2,0.....	115
Figura 58 – Curvas médias obtidas aos 7 dias de idade, para $\phi 5\text{mm}$	117
Figura 59 – Curvas médias obtidas aos 28 dias de idade, para $\phi 5\text{mm}$	117
Figura 60 – Curvas médias obtidas aos 90 dias de idade, para $\phi 5\text{mm}$	118
Figura 61 – Curvas médias obtidas aos 7 dias de idade, para $\phi 8\text{mm}$	118
Figura 62 – Curvas médias obtidas aos 28 dias de idade, para $\phi 8\text{mm}$	119
Figura 63 – Curvas médias obtidas aos 90 dias de idade, para $\phi 8\text{mm}$	119
Figura 64 – Comparativo resistência à compressão, módulo e tensão de aderência ($\phi 5\text{mm}$).....	127
Figura 65 – Comparativo resistência à compressão, módulo e tensão de aderência ($\phi 8\text{mm}$).....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Propriedades físicas do cimento CPV-ARI.....	59
Tabela 2	– Propriedades físicas e químicas do metacaulim.....	59
Tabela 3	– Propriedades físicas da areia média natural.....	62
Tabela 4	– Propriedades físicas da brita 1.....	64
Tabela 5	– Proporção dos materiais para a dosagem dos CAA's e concretos referência.....	70
Tabela 6	– Volume de concreto para as tipologias trabalhadas.....	71
Tabela 7	– Quantitativo de materiais.....	71
Tabela 8	– Resistência à Compressão Axial (MPa).....	89
Tabela 9	– Comparativo resistências concretos convencionais CPV-ARI.....	90
Tabela 10	– Testes ANOVA e TUKEY, resistência à compressão axial, para as amostras CAA-1,6, CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55.....	94
Tabela 11	– Módulo de Elasticidade Longitudinal (GPa).....	96
Tabela 12	– Comparativo módulo de elasticidade NBR 6118:2014.....	100
Tabela 13	– Resistência à tração por compressão diametral (MPa).....	102
Tabela 14	– Comparativo resistência à tração direta NBR 6118:2014.....	103
Tabela 15	– Testes ANOVA e TUKEY, resistência à tração por compressão diametral, para as amostras CAA-1,6, CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55.....	105
Tabela 16	– Tensão de aderência (MPa).....	122
Tabela 17	– Testes ANOVA e TUKEY, tensão de aderência, para as amostras CAA-1,6, CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55 (ϕ 5mm).....	124
Tabela 18	– Testes ANOVA e TUKEY, tensão de aderência, para as amostras CAA-1,6, CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55 (ϕ 8mm).....	125

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2	IMPORTÂNCIA DO TEMA	14
1.3	OBJETIVO GERAL	15
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	A INDÚSTRIA DO CIMENTO PORTLAND	17
2.2	MATERIAIS ALTERNATIVOS DE REUSO	19
2.3	GEOPOLÍMEROS	20
2.3.1	Definição	20
2.3.2	Histórico	20
2.3.3	Mecanismo de reação dos compostos ativados alcalinamente	21
2.3.4	Materiais pertinentes para a fabricação dos geopolímeros	24
2.3.4.1	Metacaulim	24
2.3.4.2	Cinza da casca de arroz (CCA)	25
2.3.5	Concretos ativados alcalinamente	27
2.3.5.1	Dosagem dos concretos ativados alcalinamente	27
2.3.5.2	Resultados atingidos com os concretos ativados alcalinamente	29
2.3.5.3	Aderência dos concretos geopoliméricos	33
2.4	PROPRIEDADES GERAIS DOS CONCRETOS	35
2.4.1	Resistência	35
2.4.2	Módulo de elasticidade	36
2.4.3	Dosagem do concreto de alta resistência inicial - Método de Dosagem do IPT/EPUSP Helene & Terzian	38
2.5	ADERÊNCIA ENTRE CONCRETO E ARMADURA	45
2.5.1	Tipos de aderência	47
2.5.1.1	Aderência por adesão	47
2.5.1.2	Aderência por atrito	48
2.5.1.3	Aderência mecânica	49
2.5.2	Fatores que influenciam no comportamento quanto à aderência	50
2.5.3	Ensaio de Aderência	51
2.5.3.1	Ensaio de Arrancamento PULL-OUT TEST	52
2.5.3.2	Ensaio de Arrancamento PUSH-OUT TEST	54

2.5.3.3	Ensaio de Flexão BEAM-TEST	54
2.5.3.4	Ensaio de Extremo de Viga BEAM END TEST.....	54
2.5.3.5	Ensaio de Tirante	55
2.5.3.6	Ensaio das quatro barras	56
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
3.1	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	58
3.1.1	Cimento Portland	58
3.1.2	Metacaulim HP Ultra.....	59
3.1.3	Cinza da casca de arroz (CCA).....	60
3.1.4	Soda cáustica (NaOH).....	60
3.1.5	Agregados.....	60
3.1.5.1	Agregado miúdo	61
3.1.5.2	Agregado graúdo.....	63
3.1.6	Água de amassamento.....	65
3.1.7	Enxofre puro (Fornecedor - Labsynth).....	65
3.1.8	Barras de aço	65
3.2	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	66
3.2.1	Panorama geral	67
3.2.2	Dosagem dos concretos ativados alcalinamente (CAA) e dos concretos convencionais....	68
3.2.3	Volume de concreto totalizado	70
3.2.4	Amassamento dos concretos ativados alcalinamente	72
3.2.5	Amassamento dos concretos de alta resistência inicial	72
3.2.6	Adensamento, moldagem e cura das amostras	72
3.2.7	Ensaio destrutivos e manuseio de dados	73
3.2.7.1	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	73
3.2.7.2	Ensaio de resistência à compressão axial.....	74
3.2.7.3	Ensaio do módulo de elasticidade.....	75
3.2.7.4	Ensaio de arrancamento	77
3.2.7.5	Ensaio de tração das barras de aço.....	81
3.2.7.6	Sistema de aquisição de dados.....	82
3.2.7.7	Tratamento estatístico de dados.....	84
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAS DE AÇO.....	87
4.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CONCRETOS	89
4.2.1	Resistência à compressão axial.....	89
4.2.2	Módulo de elasticidade.....	96

4.2.3 Resistência à tração por compressão diametral	102
4.2.4 Aderência da interface concreto/aço.....	107
4.2.4.1 Concretos de alta resistência inicial (CPV-ARI 0,45)	108
4.2.4.2 Concretos de alta resistência inicial (CPV-ARI 0,55)	111
4.2.4.3 Concretos ativados alcalinamente (CAA-1,2).....	112
4.2.4.4 Concretos ativados alcalinamente (CAA-1,6).....	113
4.2.4.5 Concretos ativados alcalinamente (CAA-2,0).....	115
4.2.4.6 Comparativo das curvas conforme as idades de ruptura.....	117
4.2.4.7 Tensão de aderência média para os concretos	122
5 CONCLUSÕES	130
5.1 CONCLUSÕES DO TRABALHO	130
5.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	132
REFERÊNCIAS	133
APÊNDICE A – FORÇAS MÉDIAS DE ARRANCAMENTO EM RELAÇÃO AO DESLOCAMENTO SOFRIDO PELAS BARRAS DE AÇOS DE 5 E 8mm – ENSAIOS AOS 7 DIAS.	141
APÊNDICE B – FORÇAS MÉDIAS DE ARRANCAMENTO EM RELAÇÃO AO DESLOCAMENTO SOFRIDO PELA BARRAS DE AÇOS DE 5 E 8mm – ENSAIOS AOS 28 DIAS.	145
APÊNDICE C – FORÇAS MÉDIAS DE ARRANCAMENTO EM RELAÇÃO AO DESLOCAMENTO SOFRIDO PELA BARRAS DE AÇOS DE 5 E 8mm – ENSAIOS AOS 90 DIAS.	149

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor da construção civil possui uma grande representatividade na economia global. Os componentes clássicos que integram as obras de infraestrutura apresentam produção em larga escala, justificada pela grande demanda desses materiais. O cimento Portland produz uma grande carga poluente no seu processo de fabricação, o que instiga o ramo de pesquisa científica a buscar novos materiais que possam substituir esse componente.

Existem linhas de pesquisa que abordam a substituição parcial do cimento Portland nas matrizes de argamassas e concretos; os materiais que detém capacidade de apresentar bom desempenho quando inseridos nas dosagens são os materiais pozolânicos. Tais materiais apresentam propriedades físicas, químicas e em escala microscópica que atendem os requisitos dos materiais reativos nas matrizes de cimento, desde que incorporados e dosados de maneira coerente. De acordo com Tashima (2006), seu caráter silico-aluminoso é de extrema pertinência quando se pretende substituir os materiais clássicos das argamassas e concretos.

A substituição integral do cimento fornece como alternativa os geopolímeros, os quais se caracterizam por fornecer outro meio de aglomeração, uma vez que o cimento Portland não é mais um componente da mistura. Segundo Shi *et al.* (2006), os geopolímeros tiveram sua difusão iniciada na década de 1930, através da ativação da escória com uma solução de potássio. Tais componentes são, hoje, uma grande vertente de pesquisa no ramo dos materiais alternativos de construção civil.

Os componentes com ativação alcalina representam uma alternativa para utilização em relação às argamassas e concretos convencionais. Dada as inúmeras propriedades mecânicas que são essenciais nos concretos, é de extrema relevância avaliar tais propriedades também nos eventuais concretos geopoliméricos. Portanto, o objetivo do trabalho será avaliar o desempenho dos concretos ditos alternativos (ativados alcalinamente), em comparação com os concretos convencionais.

1.2 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Segundo Cai *et al.* (2016), a indústria do cimento Portland é uma das indústrias mais difundidas no mundo, com uma geração total de aproximadamente 5% de toda a emissão de

CO₂ global. A produção do cimento Portland é altamente custosa. O custo de instalação de uma fábrica de cimento é bastante elevado, próximo a 200 dólares por tonelada de cimento produzida por ano (NEVILLE, 2016). Optar por materiais que negligenciem a utilização do cimento Portland pode se mostrar como alternativa sustentável.

Em conjunto ao cimento Portland, porém voltando a análise para componentes próprios para a confecção dos compostos ativados alcalinamente, o silicato de sódio constitui um ativador altamente eficiente para o alcance de resultados satisfatórios. Entretanto, sua produção apresenta índices consideráveis de emissão de gases, evidenciando um caminho inverso ao da sustentabilidade. Ativadores alternativos constituem uma linha muito eficaz, em termos de resultado e em termos sustentáveis. Esses materiais possuem em sua composição o silício, o qual se trata do composto químico essencial para as reações químicas na matriz.

A utilização de procedimentos que substituam por completo o cimento Portland e o silicato de sódio podem fornecer uma alternativa altamente sustentável, uma vez que na tentativa de reproduzir o mesmo desempenho dos compósitos clássicos, estará sendo utilizado resíduos de outros ramos, a exemplo das pozzolanas, as quais podem ter sua origem tanto na agricultura, a exemplo da cinza do bagaço de cana-de-açúcar e a cinza da casca de arroz, quanto no tratamento de águas, ramo este sendo representado pela cinza de lodo de esgoto.

1.3 OBJETIVO GERAL

Analisar as propriedades mecânicas de concretos com ativação alcalina prévia, estabelecendo, em conjunto, um comparativo para com os concretos ditos convencionais, já que o cimento Portland será suprimido de maneira integral nas matrizes dos concretos alternativos. Tal análise será pautada na investigação das propriedades mecânicas dos concretos, de modo que aderência desses compostos com as barras de aço seja o foco primordial da pesquisa.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Confeccionar um concreto alternativo otimizado, com diferentes dosagens, este com dispensa integral da utilização do cimento Portland e silicato de sódio;
2. Investigar as melhores propriedades mecânicas dos concretos alternativos que serão elaborados, montando um comparativo para diferentes concretos de alta resistência inicial;

3. Buscar os concretos alternativos que possibilitarem sua classificação como f_{cm28} de 30 MPa;
4. Analisar, em concomitância com a característica de resistência à compressão axial, quais grupos apresentam o módulo de elasticidade longitudinal na faixa de 15 GPa;
5. Determinar o comportamento da aderência dos concretos ativados alcalinamente com as barras de aço estruturais, comparando-os com os concretos de alta resistência inicial, elaborados com cimento Portland.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é estruturado conforme os seguintes capítulos:

- Segundo capítulo: revisão bibliográfica pertinente ao tema, com estudos clássicos, procedimentos e resultados prévios obtidos;
- Terceiro capítulo: trata da metodologia usada no trabalho;
- Quarto capítulo: reúne os resultados observados;
- Quinto capítulo: retrata as conclusões obtidas;
- Apresentação das referências bibliográficas, com normas, livros e artigos de periódicos que foram base para a construção do trabalho;
- Apêndices com os pontos representativos das curvas de arrancamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A INDÚSTRIA DO CIMENTO PORTLAND

A ênfase crescente nos impactos ambientais gerados pela indústria dos materiais de construção civil, tal qual a do cimento Portland, tem fornecido uma alavancagem importante na questão da reutilização de resíduos e materiais que são instrumentos de descarte (RAMUJEE, *et al.*, 2017).

Segundo Gao *et al.* (2017), a China é o país que mais produz cimento no mundo e em acréscimo é o maior emissor de gás carbônico; em termos quantitativos, no ano de 2015, o país produziu 2340 mt (megatoneladas) de cimento, abrangendo 57,01% da produção mundial (4180 mt). Gao *et al.* (2017) acrescentam que, por conta da contínua modernização e do crescimento econômico, estima-se que a demanda de cimento cresça nos próximos anos.

Um dos materiais fundamentais para o concreto é o cimento Portland. Tal material é enquadrado dentro da categoria dos cimentos hidráulicos, visto que reagem quimicamente com a água, endurecendo sob a mesma (NEVILLE, 2016). O nome “cimento Portland”, atribuído originalmente devido à semelhança em cor e qualidade do cimento endurecido com a pedra de Portland (um calcário extraído em Dorset), é utilizado até hoje, em todo o mundo, para descrever o cimento obtido pela queima, à temperatura de clínquerização, de uma mistura íntima de materiais calcários e argilosos ou de outros materiais que contenham sílica, alumina e óxidos de ferro, e pela posterior moagem do clínquer resultante (NEVILLE, 2016).

No que diz respeito à produção do cimento Portland, normalmente, o processo de queima representa entre 40 e 60% do custo de produção, enquanto que a extração das matérias-primas representa somente 10% do custo total (NEVILLE, 2016).

O cimento Portland é o material mais consumido no setor da construção civil. O avanço da infraestrutura incentivou a pesquisa por materiais que fornecessem propriedades satisfatórias para a aplicação na área da construção civil. A indústria do cimento é uma das fontes mais significativas dos gases do efeito estufa (GAO *et al.*, 2015).

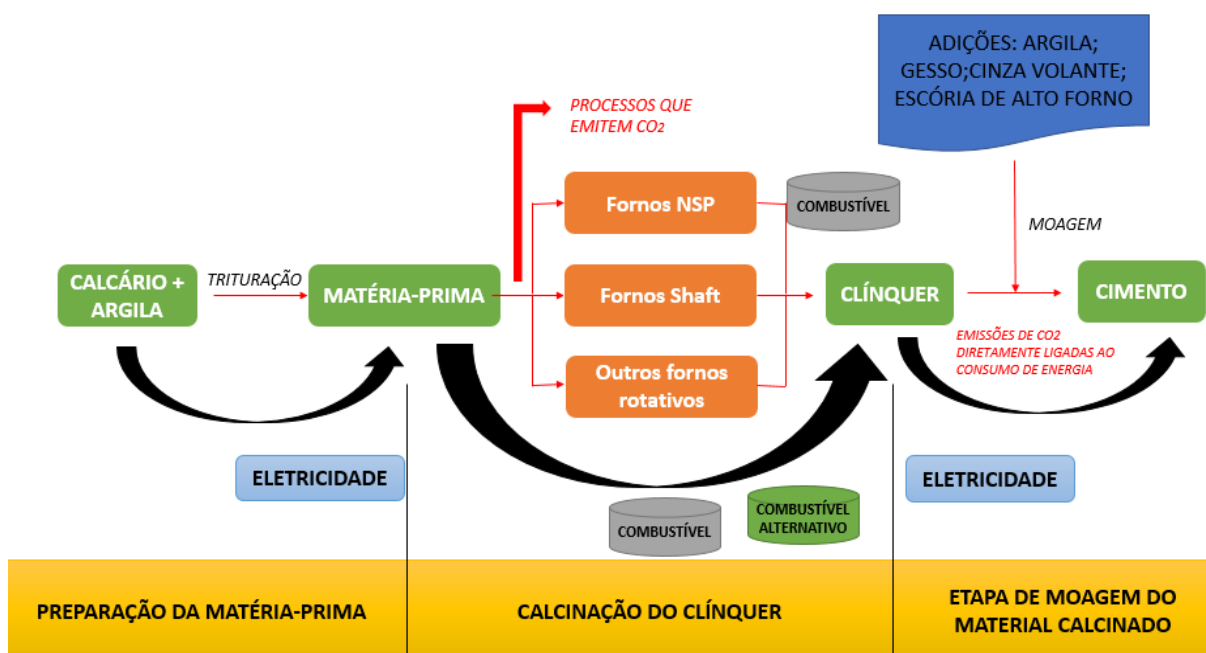
Essa indústria abrange duas fontes de emissão: a advinda diretamente da queima do combustível fóssil e a relacionada com os processos de fabricação do cimento (SHEN *et al.*, 2014). Por volta de 1990, nos Estados Unidos, o consumo médio de energia para a produção de uma tonelada de cimento, por meio do processo por via seca, era de 1,6 MWh. Nas fábricas

modernas, esse valor é bem menor, estando abaixo de 0,8 MWh na Áustria, por exemplo. O consumo de eletricidade, que fica entre 6 e 8% do total da energia utilizada, normalmente é da seguinte ordem: 10 kWh para a moldagem das matérias-primas, 28 kWh na preparação do clínquer, 24 kWh na queima e 41 kWh na moagem (NEVILLE, 2016).

O processo de fabricação do cimento geralmente inclui três estágios: preparação da matéria-prima, calcinação do clínquer e posterior moagem do material. Nessas etapas, a emissão do dióxido de carbono pode ser seccionada em duas partes. São elas: emissões diretas provenientes da queima do combustível fóssil e decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3), computando em 90% das emissões totais; os 10% restantes são atribuídos ao consumo de energia necessário para desenvolver esses processos (ZHANG *et al.*, 2018).

A figura abaixo ilustra as etapas da produção do cimento, em conjunto com os materiais que são necessários para a obtenção do produto final.

Figura 1 – Etapas da fabricação do cimento.



Fonte: Zhang *et al.* (2018). Adaptado pelo autor.

Independentemente da tecnologia utilizada na indústria de cimento, de maneira geral, todo o complexo se resume em dois moinhos para a matéria-prima e um forno de combustão (ZHANG *et al.*, 2018). As emissões se concentram nos fornos, em que a parcela primordial é de responsabilidade dos fornos de cimento, em detrimento dos fornos rotativos (ZHANG *et al.*, 2018).

De acordo com Zhang *et al.* (2018), durante a fase de calcinação do clínquer, uma vasta quantidade de energia é solicitada para que a temperatura buscada seja atingida. De fato, na totalidade das emissões de CO₂ levantadas no processo de fabricação do cimento Portland, a etapa de queima do material resultante da trituração do calcário é a que mais contribui com as emissões.

2.2 MATERIAIS ALTERNATIVOS DE REUSO

São notórias as aplicações dos materiais de reuso nas matrizes de cimento e argamassa. Em algumas situações, o procedimento é pautado em substituir quantidades parciais de cimento por algum material que apresente os requisitos que os dão a classificação de materiais pozolânicos. É exposto na Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2012) que todo material dito pozolânico tem composição silicosa ou silicoaluminosa que, por si só, apresenta baixa ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente dividido e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades aglomerantes. Segundo Tashima (2006), as características típicas dos materiais pozolânicos levam em consideração: alto teor de SiO₂ ou SiO₂/Al₂O₃, granulometria fina e material com fase amorfa. Caso essas características sejam evidenciadas, o material é capaz de reagir com o portlandita proveniente da hidratação do cimento.

Uma via notória de reutilização de descartes é o aproveitamento de resíduos da construção civil. Conforme exposto por Zhang *et al.* (2017), o concreto proveniente da demolição de edificações pode ser de extrema utilidade ao funcionar como agregado alternativo em novas matrizes e concreto. As propriedades físicas e mecânicas, além de uma guia para a aplicação de concretos com agregados reciclados, em união com a performance e a viabilidade em peças estruturais, tem sido documentada por muitos pesquisadores e muitas organizações (ZHANG, *et al.*, 2017).

Outras situações podem ser centradas na subtração de uma parcela de alguns agregados; a areia, por exemplo, pode ser subtraída por algum material com ótimos quantitativos do material silício; a função nesse caso seria focada com o preenchimento das matrizes de concreto.

Contudo, existe toda uma sistemática de preparação dos resíduos, através da moagem e peneiramento dos detritos da construção, processo este que solicita disponibilidade de recursos e de tempo, para que se obtenha um agregado de alta qualidade. Em termos

econômicos, não há economia energética e no preço final propriamente dito (ZHANG, *et al.*, 2017).

2.3 GEOPOLÍMEROS

2.3.1 Definição

Os compostos ativados alcalinamente, ou conforme a literatura em questão, geopolímeros, são constituídos usualmente de dois componentes: um material cimentante e um ativador alcalino (SHI, *et al.*, 2011).

Álcalis cáusticos ou sais alcalinos são normalmente utilizados como ativados alcalinos (SHI, *et al.*, 2011). Uma variedade de resíduos alumino-silicosos e subprodutos industriais tem sido utilizada nas ativações alcalinas de pastas, argamassas e concretos. Alguns desses materiais incluem: escória granulada de alto-forno, escória granulada do fósforo, escória do aço, cinza volante, cinza vulcânica, zeólito, metacaulim, sílica ativa, entre outros (SHI, *et al.*, 2011).

2.3.2 Histórico

Os geopolímeros têm seu início com a investigação do comportamento da escória em meio alcalino a base de potássio, datando para a década de 1930. Na década subsequente, houve um estudo intensivo da produção de clínquer à base da escória e da solução de potássio (SHI, *et al.*, 2006). De acordo com Provis e van Deventer (2009), em 1940 houve a primeira síntese de materiais de construção por meio de ativação alcalina, através da escória de alto forno, com alto teor de cálcio (PACHECO-TORGAL, *et al.*, 2015).

Posteriormente, no ano de 1957, estudos mais profundos constataram a possibilidade de se produzir aglomerantes utilizando argilas com baixo teor de cálcio, portanto alumino-silicosas com pequena taxa de cálcio como constituinte. Desde então, pesquisas e projetos de desenvolvimento têm sido conduzidos (SHI, *et al.*, 2006).

Na década de 1970, houveram mudanças relevantes com as descobertas do cientista francês Davidotis, este responsável pela geração da terminologia “geopolímero” em 1979, promovendo diversas patentes de materiais silicoaluminosos (PACHECO-TORGAL, *et al.*, 2015).

No ano de 1981, a produção de aglomerantes por meio da mistura de compostos alcalinos com caulinita, calcário e dolomita, ainda por Davidotis, se difunde (SHI, *et al.*, 2006). Mais tarde, os silicatos, aluminatos e silico-aluminatos tiveram sua reatividade comprovada com concentrações alcalinas suficientes, em termos de desempenho (SHI, *et al.*, 2006).

As décadas de 1980 e 1990 viram outras investigações importantes no campo da ativação alcalina. Porém, foi apenas nos últimos anos que houve a propulsão da produção científica dos compostos álcali-ativados (PACHECO-TORGAL, *et al.*, 2015).

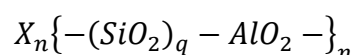
É mister ressaltar as inúmeras terminologias utilizadas na classificação dos compostos ativados alcalinamente. Este fato dificulta a consolidação desses compostos alternativos como substituinte do cimento Portland, vide a redundância a abrangência dos termos (PACHECO-TORGAL, *et al.*, 2015). As nomenclaturas “álcali-ativado” e compostos ativados alcalinamente são bem vistas na comunidade científica, apesar das inúmeras publicações apresentarem a classificação destes compostos como geopolímeros (PACHECO-TORGAL, *et al.*, 2015).

Provis (2014) relata que em algumas situações os compostos ativados alcalinamente (com o silicato de sódio como ativador) evidenciam perfis de emissões mais danosos que os concretos a base de cimento Portland. Portanto, as pesquisas com os componentes livres do silicato de sódio têm sido conduzidas no meio científico (PACHECO-TORGAL, *et al.*, 2015).

Uma vez que as resistências altas dessa novas misturas só são atingidas se o silicato de sódio for o componente ativador, resta a dúvida se essas novas formulações são, de fato, competitivas em relação ao cimento Portland, no que diz respeito à eficiência ecológica e a eficiência em termos de custo (PACHECO-TORGAL, *et al.*, 2015).

2.3.3 Mecanismo de reação dos compostos ativados alcalinamente

De acordo com Khale *et al.* (2007), Ryu *et al.* (2013), Liu *et al.* (2016) e Fan *et al.* (2018), a estrutura química generalizada dos geopolímeros pode ser expressa por:



O termo “X” denota o cátion alcalino; “n” representa o grau de poli-condensação; e “q” é a taxa Si/Al (FAN, *et al.*, 2018). O cátion alcalino pode ser representado por vários elementos, dentre eles os mais comuns são o sódio e o potássio.

O processo de geopolimerização é pautado na habilidade dos oligômeros Al e Si serem liberados numa solução altamente alcalina, para a polimerização e formação dos compostos $\text{Na(K)-(Al)}_n\text{-(Si)}_m\text{-H}$, com intervalo para a razão m/n entre 1,5 e 3 (KAMSEU, *et al.*, 2017; KONG, *et al.*, 2007).

O mecanismo da ativação alcalina em materiais ricos em sílica e calcário foi proposto por Glukhovsky (1980), em que o cátion “X” atua como um mero catalisador na fase inicial de hidratação, por meio da troca catiônica com os íons Ca^{2+} (PACHECO-TORGAL, *et al.*, 2015). Os materiais cuja composição típica é de sílica e alumina amorfa (reativa) também são altamente pertinentes para a ativação alcalina.

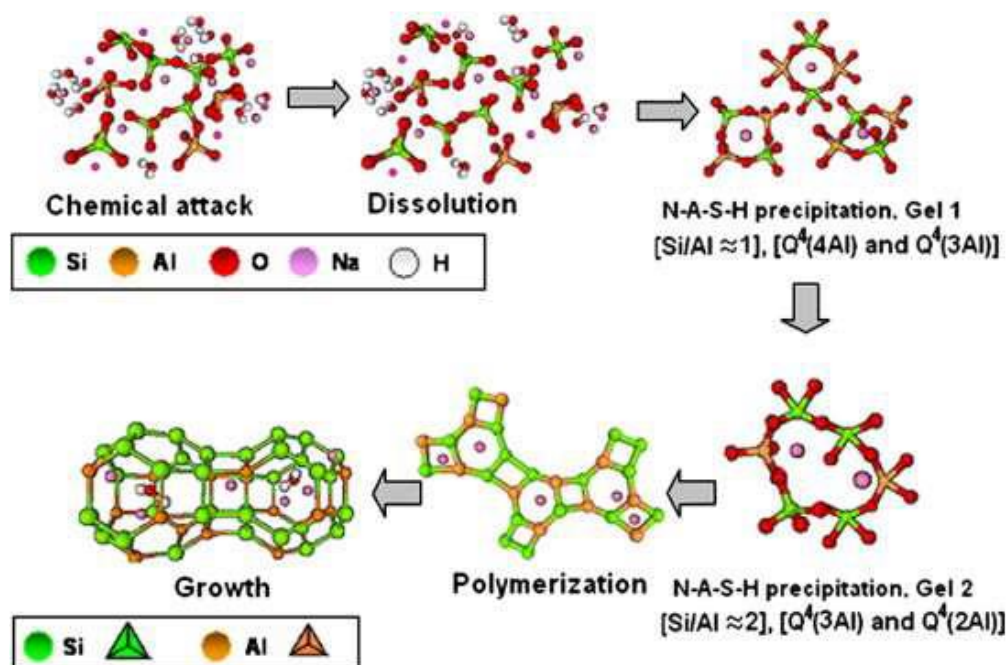
Glukhovsky (1980) ainda retrata os diferentes produtos de hidratação formados pelo cimento Portland tradicional e os minerais de rocha da superfície terrestres. Para o primeiro, os compostos formados pela hidratação são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e a portlandita (Ca(OH)_2), enquanto que para o último, os produtos resultantes da hidratação são géis de alumino-silicato contendo os álcalis (SHI, *et al.*, 2006). O composto C-S-H ditará o comportamento quanto à resistência mecânica das argamassas e dos concretos. A portlandita fornece uma segunda via para uma nova reação de hidratação, a exemplo de uma inserção de um novo aglomerante nas matrizes de cimento.

Pacheco-Torgal *et al.* (2015) afirmam que o principal produto de hidratação nos compostos ativados alcalinamente é o alumino-silicato de cálcio hidratado (C-A-S-H). Esse gel apresenta uma ligeira diferença do gel encontrado nas pastas de cimento Portland, com uma taxa reduzida da relação entre o cálcio e o silício (C/S). A estrutura e composição do gel C-A-S-H depende do tipo de ativador utilizado e também de sua quantidade dosada, bem como de fases secundárias identificadas com a ativação alcalina feita com o hidróxido de sódio (PACHECO-TORGAL, *et al.*, 2015).

Para a formação dos polímeros, ou ainda, para a transformação de uma estrutura plana para uma estrutura reticulada espacial (DAVIDOTIS, 2008), a solução alcalina é imprescindível (KAMSEU, *et al.*, 2017). Usualmente, as concentrações do ativador são maiores que 5 molares, sendo dessa forma capazes de dissolver a fase amorfa dos materiais fornecedores de silício e alumínio.

De acordo com Shi *et al.* (2011), existem três processos típicos nos aglomerantes ativados alcalinamente. São eles: dissolução/coagulação, coagulação/polimerização e polimerização/crescimento. A figura 2 ilustra de maneira sequencial as etapas evidenciadas por Shi *et al.* (2011).

Figura 2 –Etapas da ativação alcalina.



Fonte: SHI *et al.* (2011).

Conforme as etapas elucidadas, o primeiro processo de desagregação se pauta na ruptura das ligações Si-O-Si, Al-O-Al e Al-O-Si (SHI, *et al.*, 2011). Há uma redistribuição da densidade eletrônica ao redor do átomo de silício, fazendo com que a ruptura da ligação Si-O-Si esteja mais suscetível. A presença dos átomos alcalinos neutraliza os ânions, gerando o complexo Si-O-Na⁺. O segundo estágio é caracterizado pela formação de uma estrutura coagulada, advinda da desagregação dos óxidos (SHI, *et al.*, 2011). A partir dessa estrutura, ocorre a poli-condensação, que denota a formação dos géis C-A-S-H e/ou N-A-S-H. Por fim, a presença de partículas advindas da fase sólida inicial, em união com as micropartículas resultantes da condensação, favorece a precipitação dos compostos (SHI, *et al.*, 2011).

É importante detalhar os processos de formação dos géis 1 e 2. Os grupos Si-O provenientes do precursor (solução alcalina) são os responsáveis iniciais para a formação dos primeiros géis, conforme a ruptura inicial da ligação Al-O-Al (Gel 1 com fase rica em Al; Si/Al $\approx$ 1). Com o progresso das reações, a quebra dos grupos Si-O-Si oriundos do aglomerante contribuem para a formação da segunda leva de compostos hidratados (Gel 2 com fase rica em Si; Si/Al $\approx$ 2). (SHI, *et al.*, 2011).

2.3.4 Materiais pertinentes para a fabricação dos geopolímeros

Qualquer material pozolânico ou fonte cuja composição seja baseada em sílica e alumina, que se dissolva em solução alcalina, pode ser usado como componente no precursor dos geopolímeros, sofrendo por consequência o processo de geopolimerização (KHALE, *et al.*, 2007).

Nos últimos anos, as pesquisas têm mostrado que os geopolímeros sintetizados através de uma variedade de materiais de baixo custo, tais como a cinza volante, a cinza da casca de arroz, a escória de alto forno e o metacaulim, possuem alta capacidade de resistência à compressão e alto desempenho quando submetido a ambientes ácidos e a situações de temperatura elevada (FAN, *et al.*, 2018).

2.3.4.1 Metacaulim

O metacaulim é um material alumino-silicoso, termicamente ativo, obtido através da calcinação da argila caolinítica, a uma faixa de temperatura entre 650 e 800° C (MUDULI, *et al.*, 2019), dependendo do grau de cristalização da argila precursora (RAKHIMOVA e RAKHIMOV, 2018).

Conforme Rakhimova e Rakhimov (2018), os principais componentes do metacaulim são a sílica (SiO_2), entre 44,4 e 73%, e a alumina (Al_2O_3), entre 14,5% e 47,43%. Ainda de acordo com os autores, o tamanho médio das partículas do metacaulim e sua área superficial estão na faixa de 1,20-38 μm e 2,16-22 m^2/g .

Diferente das outras pozolanas artificiais, a exemplo da sílica ativa e a cinza volante, o metacaulim pode ser produzido mediante controle de qualidade rigoroso, com o intuito de atingir menores variações em sua composição, maior pureza e maior grau de pozolanicidade (MUDULI, *et al.*, 2019).

Muduli *et al.* (2019) destacam que o metacaulim, quando adicionado ao concreto, reage com o hidróxido de cálcio (portlandita) gerado do processo de hidratação do cimento, modificando a microestrutura desse concreto por meio da formação extra dos géis cimentantes C-S-H.

O metacaulim e a cinza volante são dois tipos de materiais com fonte alumino-silicosa comumente utilizados na fabricação dos geopolímeros (ZHANG, *et al.*, 2014). Os aglomerantes ativados alcalinamente com precursor definido em 50% de metacaulim e 50% de cinza volante fornecem resistências à flexão e compressão ótimas à temperatura ambiente

(ZHANG, *et al.*, 2014). Em todos os componentes estudados, sendo eles: pastas, argamassas e concretos, as propriedades mecânicas analisadas foram comparáveis as dos componentes a base de cimento Portland (ZHANG, *et al.*, 2014).

Conforme Nuaklong *et al.* (2018), a substituição parcial da cinza volante com alta taxa de cálcio pelo metacaulim em aglomerante geopoliméricos leva a uma melhoria significativa na performance dos concretos geopoliméricos, no que diz respeito às propriedades mecânicas, resistência à abrasão, propriedades de transporte e resistência ao ataque de sulfatos.

Kamseu *et al.* (2017) afirmam que o desenvolvimento de compósitos geopoliméricos à base de metacaulim, com substituição de 75% do silicato de sódio pelo ativador formado pela cinza da casca de arroz com o hidróxido de sódio, é uma alternativa importante para a produção de geopolímeros sustentáveis, sem contar na viabilidade mostrada pelos resultados tanto das propriedades mecânicas das amostras quanto das propriedades microscópicas das mesmas. Portanto, apenas 25% de silicato de sódio padrão, em termos do total do ativador alcalino, fez-se necessário para equilibrar o desempenho esperado para o aglomerante.

Rashidian-Dezfouli *et al.* (2018) constataram que a utilização de argamassas geopoliméricas a base de resíduo de fibra de vidro não têm sua resistência ditada pelo silicato de sódio. Na realidade, resistências à compressão na faixa de 80 MPa podem ser alcançadas utilizando apenas o hidróxido de sódio como ativador isolado.

Em acréscimo, a solução de silicato a base de CCA-NaOH mostrou, para a taxa molar de 3,1 ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$), características similares em relação às soluções de silicato padrão (silicato de sódio industrial), comparando os dados do difratograma de raios-X e da transformada de Fourier (KAMSEU, *et al.*, 2017). Os geopolímeros à base de metacaulim e com solução ativadora composta pelo grupo CCA-NaOH mostraram um volume acumulativo de poros relativamente maior, além de uma microestrutura mais porosa (KAMSEU, *et al.*, 2017).

2.3.4.2 Cinza da casca de arroz (CCA)

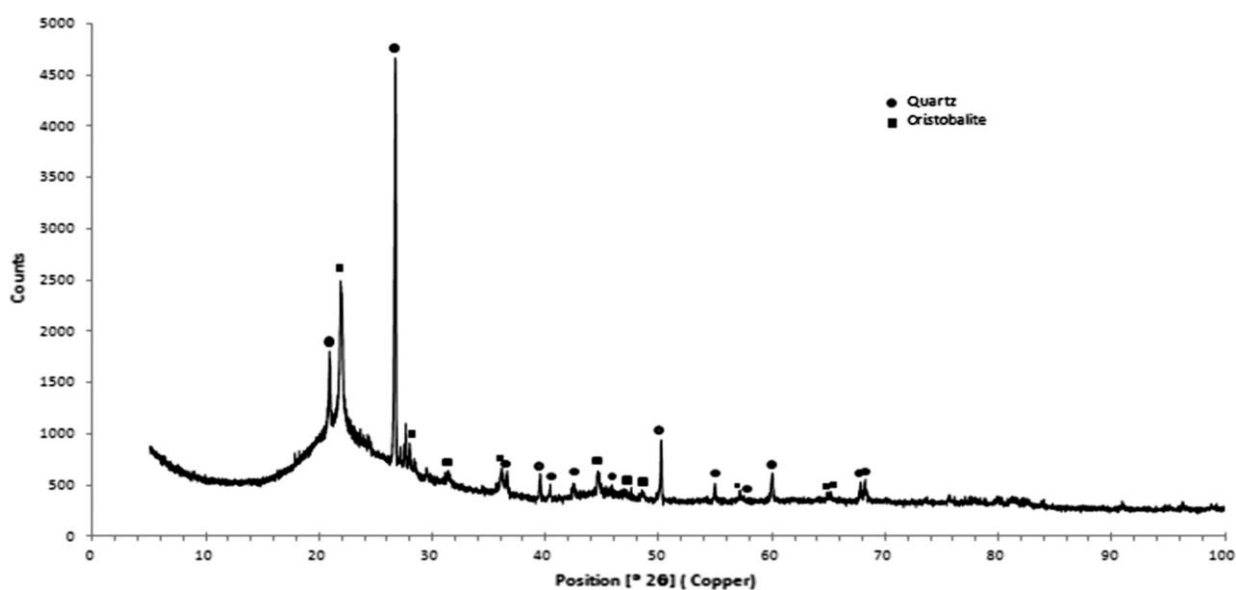
A cinza da casca de arroz (CCA) é um termo geral que descreve todos os tipos de cinza produzidas pela combustão da casca de arroz (ZOU ; YANG, 2019). Uma porcentagem na faixa de 17 a 20% de CCA é produzida à medida que a CA é queimada, se caracterizando por ser um material leve, volumoso e com muitos poros, e sua densidade no intervalo de 180 a 200kg/m³ (ZOU ; YANG, 2019).

Segundo Zou e Yang (2019), existem dois tipos de CCA: a cinza da casca de arroz branca (CCAB) e a cinza da casca de arroz preta (CCAP), de forma que irá depender da combustão completa ou incompleta para se obter determinado tipo de cinza.

A cinza da casca de arroz possui em sua composição cerca de 90 a 95% de sílica, sendo portanto utilizada como aglomerante em substituição ao aglomerante convencional (KAUR, *et al.*, 2018; BASRI, *et al.*, 2017). A reatividade dos materiais podem ser concretizadas mediante inúmeros ensaios laboratoriais. A exemplo, o ensaio DRX (difratograma dos raios-X) evidencia as fases características presentes no material ensaiado, de maneira que a reatividade será intrínseca ao componente caso o mesmo apresente uma maior fase amorfa, em detrimento da fase cristalina (picos mineralógicos).

Na figura 3, Kaur *et al.* (2018) apresentam o difratograma da cinza da casca de arroz (CCA) a qual foi instrumento de estudo do trabalho.

Figura 3 – DRX para a cinza da casca de arroz (CCA).



Fonte: Kaur *et al.* (2018).

Analizando a figura 3, é possível observar picos de quartzo e cristobalita, entretanto, a fase amorfa é predominante. A investigação do difratograma de Raios-X exprime que o principal constituinte identificado foi o SiO_2 , na forma de quartzo e cristobalita. Os maiores picos desse minerais foram vistos na escala de 2θ , em que para o quartzo observou-se seu aparecimento com $20,75^\circ$ e $26,80^\circ$ e para a cristobalita houve sua identificação com $21,70^\circ$, $28,90^\circ$, $31,20^\circ$ e 36° (KAUR, *et al.*, 2018).

Vale ressaltar que a temperatura de incineração exerce papel fundamental na composição da CCA. Zou e Yang (2019) afirmam que muitos pesquisadores constatarem a cristalização da cinza numa temperatura de queima de 900°C. Essa cristalização denota a perda da fase amorfa, fase esta que evidencia o grau de reatividade do material. Os minerais formados da cristalização são a cristobalita e a tridimita (ZOU ; YANG, 2019).

A cinza da casca de arroz pode integrar o ativador alcalino nos geopolímeros. Esse mecanismo de pré-ativação se caracteriza pela substituição do silicato de sódio por um ativador alternativo, o qual, na necessidade de apresentar o elemento silício para a formação dos géis iniciais, utiliza-se a CCA para suprir tal demanda. Em se tratando da resistência das argamassas geopoliméricas adquirem uma melhoria instantânea com o avanço nas idades das amostras e a taxa relativa entre o ativador alcalino e a CCA com valores maiores que 50% (KAUR, *et al.*, 2018).

Nos concretos geopoliméricos, de maneira análoga às argamassas, a CCA pode ser utilizada, tanto integrando parte do precursor quanto agindo como constituinte no ativador alcalino. Conforme relata Mehta e Siddique (2018), um concreto geopolimérico sustentável cujo precursor é a escória de alto forno granulada, pode ter a cinza da casca de arroz substituindo em até 15% esse escória, com o fornecimento de resistências maiores. Entretanto, com substituições superiores a 15%, há um decréscimo evidenciado na resistência. Os autores também constatarem melhorias na permeabilidade e redução do ataque de cloretos nas amostras com 15% de CCA no precursor.

Billong *et al.* (2018) levantam os benefícios em utilizar pastas geopoliméricas cujo precursor seja uma combinação do metacaulim e da cinza da casca de arroz. Foi observado pelos autores uma melhora na trabalhabilidade das pastas, substituindo parcialmente o metacaulim pela CCA. Substituições de 12,5 e 25% demonstraram incremento na resistência das pastas.

2.3.5 Concretos ativados alcalinamente

2.3.5.1 Dosagem dos concretos ativados alcalinamente

Zhang *et al.* (2014) fornecem um exemplo de dosagem em que a opção foi a utilização do silicato comercial, mais especificamente, o silicato de potássio. Em termos de composição e proporções de material, o silicato de potássio comercial utilizado apresentou 15,8% de K₂O, 24,2% de SiO₂ e 60% de H₂O, essas proporções sendo em massa, fornecendo uma taxa molar

$\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ de 2,4; em acréscimo, utilizou-se hidróxido de potássio sólido, com 90% de pureza para a obtenção da taxa molar $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ no valor 1. É notório destacar que as soluções ativadoras são preparadas um dia antes do amassamento, em razão da alta dispersão de energia térmica proveniente da implementação do hidróxido de potássio sólido (ZHANG, *et al.*, 2014).

Uma alternativa interessante é a utilização de descartes para a elaboração da solução ativadora. Dessa forma, a utilização do silicato comercial não se torna requisito indispensável. Por se tratar de um material rico em silício, o silicato deverá ser substituído por materiais que apresentem composição similar. De maneira geral, os materiais ditos pozolânicos trazem em sua composição os elementos silício e alumínio em grandes proporções, e portanto é altamente viável analisar tais compostos inseridos na solução ativadora.

Conforme a dosagem levantada por Zhang *et al.* (2014), levando em consideração o fato do precursor em análise ser uma mistura de dois materiais pozolânicos (metacaulim e cinza volante), foi constatado que para proporções maiores de metacaulim, a demanda de água aumenta para que se atinja a mesma trabalhabilidade, afirmação esta que se justifica pelo formato mais esférico das partículas da cinza volante, sendo por consequência mais susceptíveis à movimentação. Uma taxa constando no intervalo de 0,4 a 0,5 foi mantida como padrão para a fabricação das amostras de argamassa, fornecendo a trabalhabilidade desejada.

Em acréscimo, Zhang *et al.* (2014) levantam como proporção entre os materiais da matriz de concreto geopolimérico 0,4 para o fator água/precursor, e traço definido em 1: 1,3: 2,9 (precursor: agregado miúdo: agregado graúdo). A ideia pode partir da intenção em se trabalhar com concreto de traço mais rico, e portanto a parcela do precursor será muito importante na análise do produto final.

A fabricação das pastas e das argamassas é um resultado preliminar de extrema relevância, especialmente na determinação do fator água/aglomerante ideal. Alguns testes empíricos podem ser procedidos para a análise da plasticidade desses componentes, e a possibilidade efetiva em fabricar-se os modelos pré-estabelecidos.

Portanto, é de vital importância que a dosagem dos concretos ativados alcalinamente seja precedida de um levantamento dos parâmetros satisfatórios nas pastas e argamassas geopoliméricas. De posse dos dados de maior conveniência, é possível expandir a análise para a matriz de concreto. De certa forma, busca-se, no tratamento das amostras geopoliméricas, que as mesmas apresentem possibilidade de moldagem. A trabalhabilidade acaba tendo valor secundário visto que o geopolímero tem característica viscosa e fluidez relativamente inferior se comparado com as matrizes de concreto convencionais.

2.3.5.2 Resultados atingidos com os concretos ativados alcalinamente

A geopolimerização fornece uma alternativa para muitos problemas relacionados aos resíduos, em termos de tratamento e armazenamento dos mesmos. De maneira geral, os geopolímeros são materiais que solicitam moderada energia para sua fomentação, sendo portanto amistosos para com o meio ambiente (KHALE, *et al.*, 2007).

Um fator muito trabalhado na análise desse tipo de componente é a proporção entre o sódio e a solução de silicato, uma vez que é de notória relevância uma sílica em estado solúvel para o ataque aos oligômeros de alumínio (DAVIDOVITS, 2008).

As argamassas geopoliméricas apresentam propriedades quase que similares em relação ao cimento convencional, sendo elas: resistência, dureza e estabilidade química (KAUR, *et al.*, 2018). São dotados de resistência à incêndio e ataques de meios ácidos (KAUR, *et al.*, 2018; GUADES, 2016).

Segundo Kaur *et al.* (2018), os fatores que interferem no processo de preparação e efetivo controle das propriedades dos geopolímeros englobam as características do descarte usado na elaboração das matrizes (tipo, composição química e reatividade), e a dosagem do ativador alcalino. As condições e a temperatura de cura afetam a geopolimerização (LANCELLOTTI, *et al.*, 2013).

Os concretos geopoliméricos têm atraído muitos pesquisadores para o estudo e análise de sua eficácia para o uso na indústria da construção, na qual a demanda por cimento vem aumentando no mundo inteiro. A grande vantagem que o concreto geopolimérico apresenta, com relação aos benefícios ambientais e a utilização de aglomerante cuja composição é majoritariamente de materiais reaproveitados, se tornou uma motivação para dar continuidade a um estudo detalhado inicializado por pesquisas prévias (HUSEIEN, *et al.*, 2017).

Diversas linhas de pesquisa podem ser conduzidas por meio dos concretos geopoliméricos. É mister ressaltar que na abordagem de um material alternativo, existe uma vertente que não pode ser negligenciada, sendo esta as propriedades mecânicas desses novos componentes. E para efeito de comportamento estrutural, o estudo pode ser conduzido em direção à análise direta de peças estruturais. Alguns elementos de viga e de pilares podem ser produzidos em laboratório, desde que as dimensões se encaixem nas limitações dos ensaios e do ambiente próprio para o ensaio.

Zhang *et al.* (2017) investigaram o comportamento estrutural de pilares de concreto geopolimérico reciclado, com esferas de concreto de demolição substituindo parcialmente o

concreto fresco. Os pilares foram submetidos a carregamento axial. Os concretos geopoliméricos utilizados na concretagem dos pilares foram estabelecidos em dois grupos, um com resistência à compressão maior e outro com esta propriedade reduzida.

No que faz referência à dosagem, os geopolímeros foram derivados através da mistura da solução de silicato de potássio, precursor a base de metacaulim e cinza volante, e agregados graúdos e miúdos. Os ativadores alcalinos tiveram sua composição descrita em três componentes: água, hidróxido de potássio (KOH) e silicato de potássio (K_2SiO_3) com proporção de 40% em massa. A ativação alcalina foi previamente misturada e deixada em repouso por 24 horas, a temperatura ambiente (ZHANG, *et al.*, 2017).

Comparado com os pilares de concreto reciclado comum, o efeito da taxa de substituição na capacidade de carga dos pilares de concreto reciclado geopolimérico é maior. Uma redução de 10% na capacidade de carga ocorreu nas colunas de concreto reciclado geopolimérico, numa taxa de 24% de substituição do concreto fresco pelas esferas. Os pilares de concreto reciclado geopolimérico (com as esferas de concreto de demolição) que apresentam baixa resistência à compressão exibiram menor capacidade de carga e rigidez, porém houve aumento na deformação dúctil (ZHANG, *et al.*, 2017).

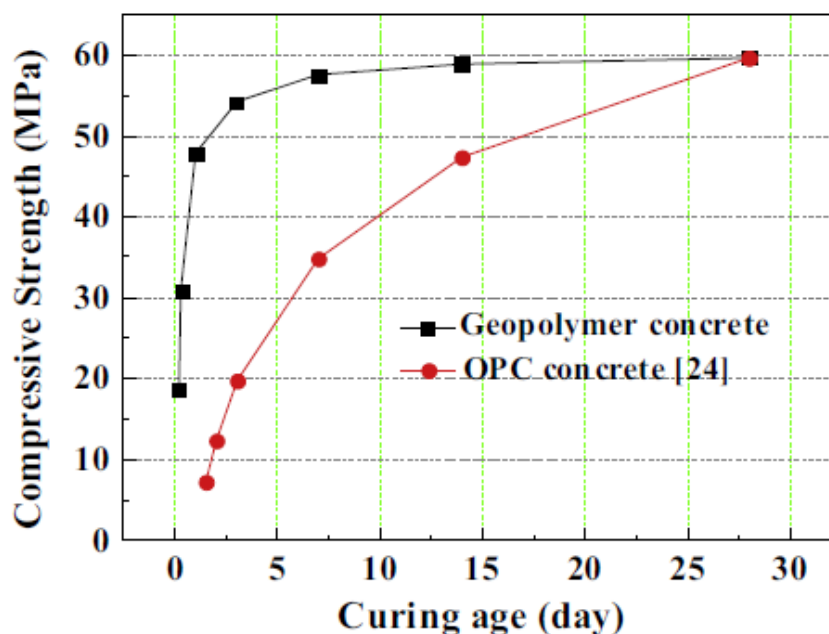
Embora os pilares de concreto reciclado geopolimérico tenham exibido menor capacidade de carga e menor rigidez, comparando-os com os pilares de concreto reciclado comum, ambos com a mesma taxa de substituição pelas esferas de concreto de demolição, as peças estudadas de concreto geopolimérico podem atender os requisitos de dimensionamento estrutural, com capacidade de carga suficiente, rigidez adequada e boa ductilidade (ZHANG, *et al.*, 2017).

Partindo para uma análise do efeito da cura térmica nos concretos ativados alcalinamente, Zhang *et al.* (2018) trazem que para temperaturas acima de 300°C, os concretos geopoliméricos perdem de maneira significativa sua resistência nas ligações da matriz. Numa abordagem partindo para a aderência desse componentes aos vergalhões de aço, existe um decréscimo dessa propriedade à medida que há o fornecimento de temperatura para as amostras.

Os concretos geopoliméricos apresentam propriedades similares ou superiores se comparados com o concreto convencional de cimento Portland (ZHANG, *et al.*, 2018). Houve constatação, em acréscimo, de melhorias nas propriedades de ligação (aderência) com o reforço das barras estruturais, acarretando num desempenho mais satisfatório quando as amostras foram expostas à elevada temperatura.

A evolução na resistência à compressão axial dos concretos geopoliméricos se dá, de acordo com os dados levantados por Zhang *et al.* (2018), com ganho significativo em idades curtas. Numa linha comparativa entre os concretos ativados alcalinamente e os concretos convencionais, dependendo da tipologia de cimento Portland utilizada, as resistências iniciais podem ser altas, para o caso do CPV-ARI. A figura 4 mostra o crescimento observado para os dois grupos de concreto.

Figura 4 – Evolução da resistência à compressão.



Fonte: Zhang *et al.* (2018).

Conforme Zhang *et al.* (2018), aos sete dias de cura, 96% da resistência à compressão aos 28 dias foi atingida, o que denota que os ganhos entre as idades base são pouco significativos, enquanto que para o concreto de cimento Portland, esse percentual foi de 59% em relação à resistência de 28 dias.

Mo *et al.* (2016) confirmam o fato dos concretos geopoliméricos poderem ser dimensionados como elementos estruturais de vigas e pilares. Em acréscimo, as peças de concretos geopoliméricos e de concretos convencionais apresentaram desempenhos similares, quando se trata dos reforços estruturais. A recomendação é de se criar códigos práticos para a utilização do concreto nas peças que irão receber cargas significativas. Porém, de qualquer forma, não há nenhum efeito negativo ao se utilizar esse tipo de componente.

Os dados levantados por Singh *et al.* (2015) definem de maneira clara a possibilidade dos concretos geopoliméricos serem pertinentes como material de construção. Um número

vasto de propriedades foi investigado, com altas resistências obtidas nos ensaios conduzidos. Apesar de se tratar de um produto tecnicamente desafiador, uma implementação bem-sucedida pode ser alcançada no tratamento desse tipo de material.

Segundo Mathew *et al.* (2018), as vigas de concreto geopolimérico possuem redução na sua capacidade de carga se submetidas a temperaturas superiores à 600°C. Tal redução é atribuída em especial ao decréscimo da ligação nas barras de aço decorrente da temperatura elevada. A ductilidade das vigas de concreto geopolimérico reduzem de maneira rápida com a elevação da temperatura em análise.

É válido ressaltar que a curva-momento encontrada para as vigas de concreto geopolimérico e para as vigas de concreto convencional são semelhantes, o que torna possível uma utilização de análise comparativa para com as deformações clássicas das vigas de concreto convencional, caso a procura seja das deformações convenientes nas peças de concreto alternativo (MATHEW, *et al.*, 2018).

Em acréscimo ao estudo das vigas de concreto geopolimérico, Un *et al.* (2015) complementam com uma possível estimativa das deflexões a longo prazo dessas peças estruturais poder ser elaborada com base nas deflexões observadas nas vigas de concreto com cimento Portland, existindo então comportamentos próximos com relação aos dois grandes grupos.

Num viés mais voltado para as propriedades físicas dos concretos geopoliméricos, Albitar *et al.* (2017) afirma que os concretos de cimento Portland possuem menor absorção de água e porosidade, comparado com os concretos geopoliméricos a base de cinza volante e escória granulada de fundição de chumbo. Essas propriedades, entretanto, podem ser melhoradas com nanoplaquetas de grafeno.

Em contrapartida, os concretos de cimento Portland sofrem maior deterioração se expostos aos sulfatos. O ácido sulfúrico têm maior impacto de deterioração nos concretos convencionais, com reduções de resistência à compressão mais altas se comparados aos concretos geopoliméricos (ALBITAR, *et al.*, 2017).

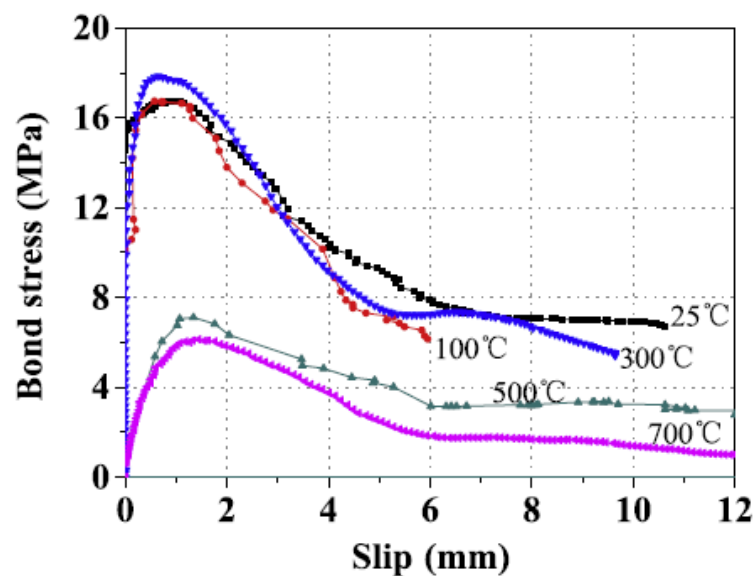
Conforme os distintos trabalhos que vão sendo reunidos, a viabilidade dos concretos geopoliméricos é clara. Diversas linhas, sejam elas focadas em propriedades mecânicas, ou em propriedades estruturais de peças (vigas, pilares ou lajes), ou ainda características físicas das matrizes de concreto, demonstram resultados significativos. Portanto essa vertente da pesquisa científica no ramo dos materiais alternativos possui grande difusão e grandes promessas de trabalhos futuros.

2.3.5.3 Aderência dos concretos geopoliméricos

A avaliação da aderência dos concretos geopoliméricos é de extrema relevância quando se pretende qualificar tal material alternativo em termos de suas propriedades mecânicas. O ensaio de arrancamento (pull-out test) fornece a força necessária para o arranque da barra de aço da matriz de concreto, sendo o parâmetro necessário para o levantamento empírico da tensão de aderência dos materiais.

O ensaio de arrancamento para os concretos geopoliméricos retrata um comportamento de um patamar inicial de crescimento da força de tração e deslizamento reduzido da barra de aço. Atingido o patamar, a barra é arrancada, de maneira que a força de tração vai se reduzindo até atingir um patamar de linearidade, o qual corresponde ao aumento do escorregamento da barra para uma força que atinge certa constância. Zhang *et al.* (2018) expressam essas curvas de arrancamento conforme diferentes temperaturas (figura 5).

Figura 5 – Curvas de arrancamento para concreto geopolimérico submetido a diferentes temperaturas.



Fonte: Zhang *et al.* (2018).

Zhang *et al.* (2018) identificam quatro tipologias características de ruptura do corpo de prova no ensaio de arrancamento (pull-out test). São elas: falha típica de escorregamento, falha na ligação entre a barra e a matriz geopolimérica (falha no arrancamento), falha combinada de escorregamento e ligação, e ruptura da barra de aço.

Na falha típica de escorregamento, a formação de fissuras radiais no concreto que envolve a armadura é característica, com uma progressão rápida das mesmas em sentido longitudinal, culminando no colapso súbito do concreto sem maior escorregamento da armadura (ZHANG, *et al.*, 2018).

Nota-se, para a falha na ligação entre a barra e a matriz geopolimérica, um corte interfacial entre o concreto geopolimérico e a armadura, com significativo escorregamento da barra, porém sem nenhuma fissura visível (ZHANG, *et al.*, 2018).

Caso haja um notório escorregamento da barra e trincas visíveis na amostra estuda, pode-se classificar a falha como uma combinação típica de escorregamento e ligação (ZHANG, *et al.*, 2018).

A observância de algumas amostras terem as falhas tipicamente por ligeiro escorregamento da armadura e a própria ruptura da mesma traz a última classificação assim levantada por Zhang *et al.* (2018). A figura 6 ilustra todas as falhas identificadas por Zhang *et al.* (2018).

Figura 6 – Padrões de falhas na interface concreto/aço.



Fonte: Zhang *et al.* (2018).

Al-Azzawi *et al.* (2018), ao proceder com o pull-out test em compostos geopoliméricos à base de cinza volante, observaram uma falha típica de escorregamento, conforme a figura 7.

Figura 7 – Falha típica de escorregamento – colapso do concreto.



Fonte: Al-Azzawi *et al.* (2018).

Nota-se a ruptura do concreto na direção longitudinal à barra de aço.

2.4 PROPRIEDADES GERAIS DOS CONCRETOS

O concreto é, de maneira geral, um conglomerado de materiais diversos, basicamente o cimento, os agregados e a água, estes com propriedades diversas, que, à medida que se misturam, formam um composto, no estado fresco, capaz de se enrijecer e atuar como componente estrutural nos diversos ramos da engenharia. Segundo Neville (2016), é de extrema relevância, quando se considera a construção desse conglomerado (concreto), que se analise os pormenores intermediários que influenciam no concreto, tais como: transporte, lançamento, adensamento e acabamento, no seu estado fresco. É conveniente citar que a maioria dos concretos, quase que em sua totalidade, solicitam utilização de aditivos, sejam eles plastificantes ou superplastificantes.

2.4.1 Resistência

Conforme Neville (2016) e Metha e Monteiro (2008), tratar da resistência dos concretos é quantificar a tensão necessária para que o material sofra ruptura. Essa propriedade é função da fase de hidratação do cimento, a qual se caracteriza por ser lenta, em especial nos concretos convencionais de tipologia CP-II, e portanto os ensaios tradicionais para a resistência se pautam na cura dos corpos de prova sob condições padronizadas de temperatura e umidade, com extensão do período até os 28 dias.

No que diz respeito à resistência à compressão, existem alguns fatores que são intrínsecos para o estabelecimento de uma previsão dessa propriedade clássica dos concretos. Metha e Monteiro (2008) reforçam que, do ponto de vista da resistência, a relação água/cimento e a porosidade são os fatores mais importantes que influenciam nessa propriedade, uma vez de forma isolada dos demais condicionantes, a porosidade afeta a zona de interface entre a matriz de argamassa e o agregado graúdo.

O ensaio de compressão uniaxial dos concretos, considerando baixa ou média resistência, levará o corpo de prova a um estado de fissuração inicial com 50% da carga de ruptura aplicada (METHA ; MONTEIRO, 2008). As divisões conforme a resistência são expostas por Metha e Monteiro (2008), sendo: concreto de baixa resistência, abaixo de 20 MPa; concreto de resistência moderada, de 20 MPa a 40 MPa; e o concreto de alta resistência, acima de 40 MPa.

No que diz respeito à resistência à tração dos concretos, de maneira geral essa propriedade não é marcada por fornecer grandes desempenhos. Entretanto, de acordo com Metha e Monteiro (2008), as resistências à compressão e à tração têm ligação íntima entre elas, porém sem nenhum caráter de proporcionalidade direta. Conforme o aumento da resistência à compressão de um determinado concreto, a resistência à tração também aumenta, mas de acordo com uma taxa decrescente. De outra maneira, a razão entre as grandezas depende do nível geral de resistência à compressão; quanto mais alta a resistência à compressão, menor essa razão característica (METHA ; MONTEIRO, 2008).

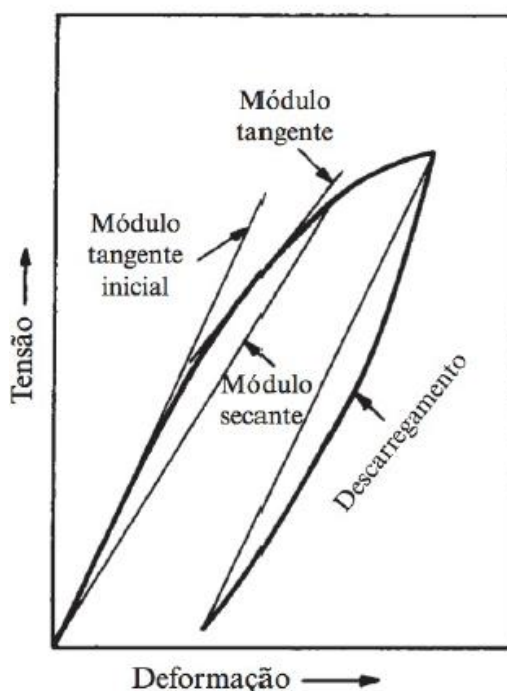
2.4.2 Módulo de elasticidade

A curva clássica tensão x deformação se caracteriza por apresentar alguns patamares específicos. Materiais típicos do ramo de infraestrutura de construção civil, como o aço, quando submetido a cargas incrementais apresenta uma resposta elástica em termos de deformação, sendo proporcionais as grandezas tensão e deformação, se tratando, portanto, da fase elástica do material. O módulo de elasticidade é definido como a inclinação da reta formada no tramo elástico, ou ainda, a razão entre tensão e deformação reversível. Em altas cargas aplicadas, à medida que a deformação não se mantém proporcional à tensão aplicada, tornando-se permanente, trabalha-se, por consequência com as deformações plásticas ou inelásticas (METHA ; MONTEIRO, 2008).

Neville (2016) expressa a elasticidade do concreto em termos de comportamento da curva tensão x deformação. O “módulo de deformação elástica” de Young é aplicado a rigor à

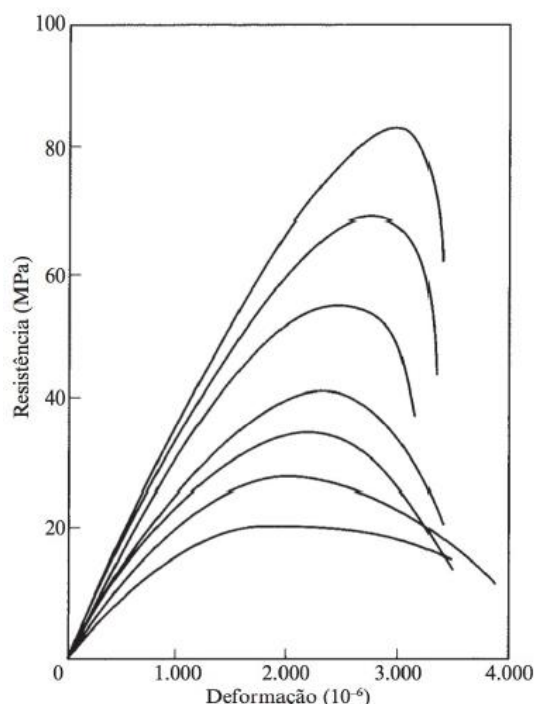
parte reta da curva, conforme ilustrado na figura 8. A velocidade de aplicação da carga tem influência primordial nas deformações observadas nos ensaios de ruptura. O módulo secante é a grandeza que abrange a consideração de ambas as deformações elásticas e por fluência do concreto. Tal propriedade é de caráter estático, sendo determinada, em laboratório, com a descrição da curva secante até 50% da aplicação da carga última do concreto.

Figura 8 – Relação tensão x deformação do concreto.



Fonte: Neville (2016).

Os corpos de prova cilíndricos de concreto, com limite de resistência até 85 MPa apresentam o seguinte comportamento da curva tensão x deformação:

Figura 9 – Curvas tensão x deformação típicas para concreto de resistência até 85 MPa.

Fonte: Neville (2016).

Segundo Metha e Monteiro (2008), os principais fatores que alteram o módulo de elasticidade do concreto podem advir do estado de umidade dos corpos de prova e o carregamento neles aplicados, os quais se classificam como condicionantes de ensaio, do módulo de elasticidade da matriz da pasta de cimento, esta última devendo portanto ser analisada em termos de porosidade e em termos da matriz propriamente dita, da porosidade dos concretos e composição da zona de transição na interface pasta e agregado, e em referência aos agregados, o próprio módulo de elasticidade do mesmos e sua fração volumétrica contribuem para interferir na porosidade e consequentemente no módulo do concreto como um todo.

2.4.3 Dosagem do concreto de alta resistência inicial - Método de Dosagem do IPT/EPUSP Helene & Terzian

O método IPT/EPUSP Helene & Terzian consiste na elaboração de três traços de concreto, com as seguintes proporções entre aglomerantes e agregados secos, em massa: 1:3,5 (traço rico), 1:5,0 (traço médio) e 1:6,5 (traço pobre). Após a ruptura das amostras destes concretos, é elaborado um diagrama de dosagem, a partir do qual é possível obter a relação entre água e cimento (a/c), o traço e o consumo de cimento para o concreto definitivo, com as características pré-determinadas.

Primeiramente é feito o cálculo da resistência de dosagem (f_{cdj}), por meio da seguinte relação:

$$f_{cdj} = f_{ckj} + 1,65 \times s_{dj} \quad (1)$$

Onde:

- f_{cdj} representa a resistência à compressão de dosagem, a j dias de idade, em MPa;
- f_{ckj} representa a resistência à compressão característica requerida para o concreto, em MPa;
- s_{dj} representa o desvio padrão de dosagem, em relação a idade j , em MPa.

Conforme é expresso por Carvalho *et al.* (2007), é de extrema relevância estabelecer uma diferenciação entre a resistência característica estimada, que é alcançada através do resultado de um número relativamente pequeno de corpos de prova com a resistência característica f_{ckj} . Entretanto, a estimativa da resistência à compressão média f_{cdj} pode ser feita mediante o procedimento estabelecido pela NBR 12655:2015. Esse valor característico é construído conforme a curva de Gauss, em que é definido como resistência característica (f_{ckj}) do concreto à compressão axial o valor representativo cuja grau de confiabilidade é padronizado em 95% (CARVALHO, *et al.*, 2007). Portanto, 95% dos resultados dos ensaios deverão estar acima desse valor, ou, de outra forma, 5% dos valores poderão estar abaixo do mesmo.

O desvio padrão pode ser calculado diretamente a partir dos resultados da obra em questão. Porém este cálculo requer no mínimo 30 resultados de amostras. Para obras onde não é possível a obtenção desta quantidade de resultados, o desvio padrão pode ser adotado da seguinte maneira:

- $s_{dj} = 3,0$ MPa, para produções em massa, com controle rigoroso da umidade dos agregados e equipe bem treinada;
- $s_{dj} = 4,0$ MPa, para produções em volume, com controle rigoroso da umidade dos agregados e equipe bem treinada;
- $s_{dj} = 5,5$ MPa, para produções em volume e equipe nova, em fase de adaptação.

A figura 10 simplifica o cálculo da resistência de dosagem por meio da tabulação de valores referência para o desvio padrão de dosagem.

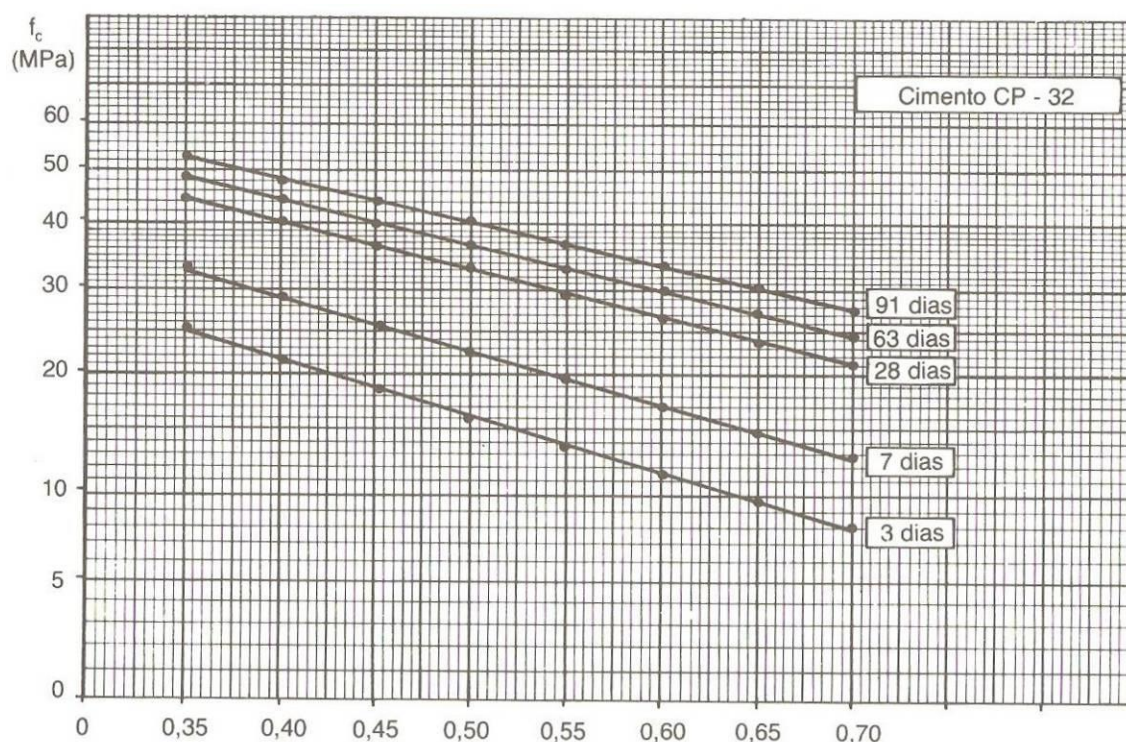
Figura 10– Resistência de dosagem.

Resistência característica do concreto f_{ck} (MPa)	Resistência de dosagem (f_{dj}) MPa		
	$s_{dj} = 3$ MPa	$s_{dj} = 4$ MPa	$s_{dj} = 5,5$ MPa
9	14	15,5	18
10 ^(*)	15	16,5	19
12	17	18,5	21
15 ^(*)	20	21,5	24
18	23	24,5	27
20 ^(*)	25	26,5	29
21	26	27,5	30
24	29	30,5	33
25 ^(*)	30	31,5	34
27	32	33,5	36
30 ^(*)	35	36,5	39

(*) segundo a NBR 8953, publicada em junho/92.

Fonte: Helene e Terzian (1993)

Calculada a resistência de dosagem, é possível determinar a relação a/c, a partir de correlações feitas pelo método, para vários tipos de cimento. A figura 11 mostra as correlações feitas pelo método, para o cimento CP – 32. Vale ressaltar que para cimento Portland de alta resistência inicial: ARI, a resistência até aos sete dias pode ser projetada pela resistência do cimento CP-32 com acréscimo de 25%, e a resistência até os 91 dias é dada pela resistência do cimento CP-32 com o acréscimo de 20%.

Figura 11 – Curvas da resistência de dosagem e fator a/c; cimento CP-32.

Fonte: Helene e Terzian (1993)

Determinada a resistência de dosagem (f_{cdj}), a análise se pauta na elaboração do traço médio (1:5,0). Para tal, é de extrema importância a determinação do teor ideal de argamassa. Trata-se de uma das etapas mais influenciadoras, pois a falta de argamassa acarreta num aumento da porosidade do concreto e falhas de concretagem. Em contrapartida, argamassa em excesso melhora a aparência do concreto, porém aumenta seu custo por metro cúbico, e também, o risco de fissuração por origem térmica (reação de hidratação do cimento) e por retração de secagem. Sendo assim, o teor de argamassa ideal deve ser o mínimo teor necessário para que não haja aumento da porosidade do concreto.

Para a determinação do teor ideal de argamassa, os dados representados na figura 12 irá fornecer o teor ideal buscado, partindo-se de um determinado teor de argamassa inicial, procedendo com os acréscimos pré-estabelecidos pelo método, até obter-se o teor de argamassa ideal. A verificação para esta etapa é feita de maneira visual, de modo que se obtenha argamassa com um padrão de trabalhabilidade aceitável. É importante deixar explícito que o teor de argamassa inicial pode ser adotado de acordo com a experiência do profissional responsável pela dosagem, não sendo necessário seguir as recomendações constantes na figura 12.

Figura 12 – Determinação do teor de argamassa ideal.

Teor de Argamassa (%)	Traço Unitário (1 : a : p)	Q ^{ida} de Areia (kg)		Q ^{ida} de Cimento (kg)		Q ^{ida} de Água (kg)		Relação a/c Final
		Massa Total	Acréscimo na Mistura	Massa Total	Acréscimo na Mistura	Massa Total	Acréscimo na Mistura	
35	1 : 1,10 : 3,90	8,46	1,22	7,69	0,25			
37	1 : 1,22 : 3,78	9,68	1,31	7,94	0,26			
39	1 : 1,34 : 3,66	10,99	1,37	8,20	0,27			
41	1 : 1,46 : 3,54	12,36	1,50	8,47	0,30			
43	1 : 1,58 : 3,42	13,86	1,59	8,77	0,32			
45	1 : 1,70 : 3,30	15,45	1,72	9,09	0,34			
47	1 : 1,82 : 3,18	17,17	1,85	9,43	0,37			
49	1 : 1,94 : 3,06	19,02	2,00	9,80	0,40			
51	1 : 2,06 : 2,94	21,02	2,17	10,20	0,44			
53	1 : 2,18 : 2,82	23,19	2,36	10,64	0,47			
55	1 : 2,30 : 2,70	25,55	2,59	11,11	0,52			
57	1 : 2,42 : 2,58	28,14	2,84	11,63	0,57			
59	1 : 2,54 : 2,46	30,98	3,12	12,20	0,62			
61	1 : 2,66 : 2,34	34,10	3,47	12,82	0,69			
63	1 : 2,78 : 2,22	37,57	3,86	13,51	0,78			
65	1 : 2,90 : 2,10	41,43		14,29				

Fonte: Helene e Terzian (1993)

A ressalva em cima da obtenção do teor de argamassa ideal deve ser feito com relação ao processo observatório da mistura à medida que os acréscimos vão sendo inseridos. Portanto é importante que o operador da dosagem tenha a sensibilidade para com a mistura em estado fresco.

Após a determinação do teor de argamassa ideal, o traço 1:5,0 pode ser elaborado. São necessárias também as tipologias de traço rico e pobre, com base nas correlações entre os traços feitas pelo método, mostradas na figura 13.

Figura 13 – Traços tabelados em função dos teores de argamassa.

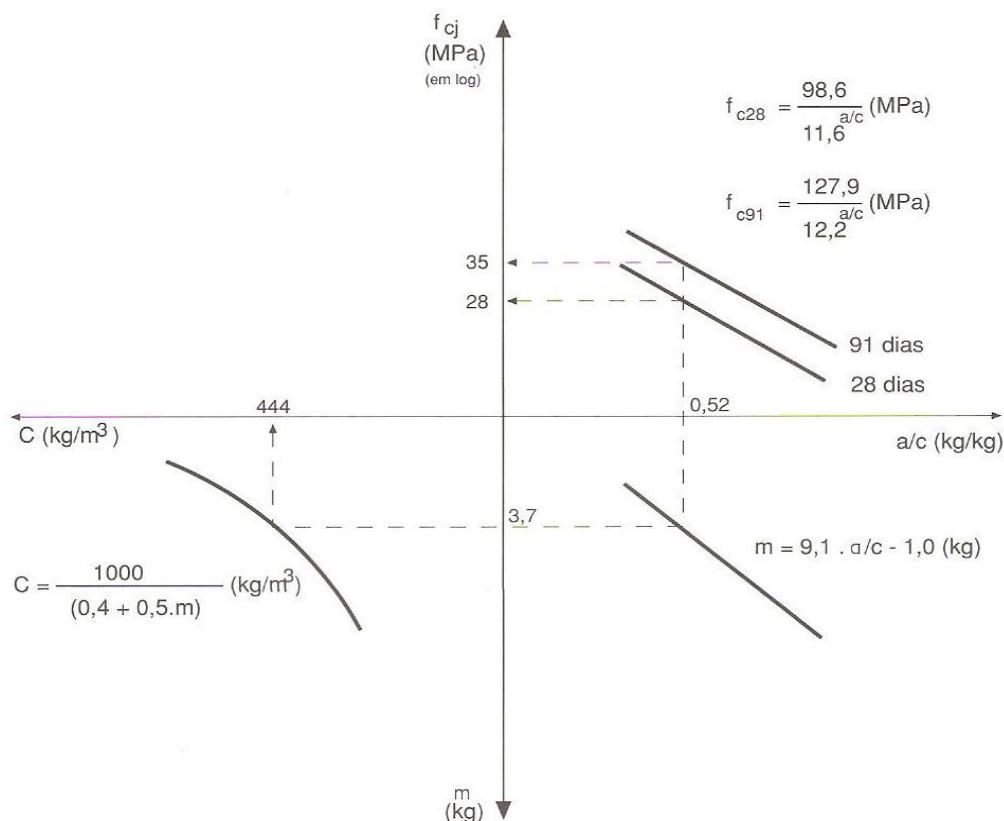
Teor de argamassa (%)	Traço 1:3,5	Traço 1:5,0	Traço 1:6,5
	Traço unitário individual rico $1:a_r:p_r$	Traço unitário individual normal $1:a_n:p_n$	Traço unitário individual pobre $1:a_p:p_p$
35	1:0,58:2,92	1:1,10:3,90	1:1,63:4,87
37	1:0,67:2,83	1:1,22:3,78	1:1,78:4,72
39	1:0,76:2,74	1:1,34:3,66	1:1,93:4,57
41	1:0,85:2,65	1:1,46:3,54	1:2,08:4,42
43	1:0,94:2,56	1:1,58:3,42	1:2,23:4,27
45	1:1,03:2,47	1:1,70:3,30	1:2,38:4,12
47	1:1,12:2,38	1:1,82:3,18	1:2,53:3,97
49	1:1,21:2,29	1:1,94:3,06	1:2,68:3,82
51	1:1,30:2,20	1:2,06:2,94	1:2,83:3,67
53	1:1,39:2,11	1:2,18:2,82	1:2,98:3,52
55	1:1,48:2,02	1:2,30:2,70	1:3,13:3,37
57	1:1,57:1,93	1:2,42:2,58	1:3,28:3,22
59	1:1,66:1,84	1:2,54:2,46	1:3,43:3,07
61	1:1,75:1,75	1:2,66:2,34	1:3,58:2,92
63	1:1,84:1,66	1:2,78:2,22	1:3,73:2,77
65	1:1,93:1,57	1:2,90:2,10	1:3,88:2,62

Fonte: Helene e Terzian (1993)

Para cada um dos traços produzidos, são feitas amostras (corpos de prova) que devem ser submetidas à cura e, nas idades pré-estabelecidas, submetidas à carga de ruptura através das máquinas ou prensas universais.

Com os resultados obtidos devem ser elaborados os diagramas de dosagem, como o mostrado na figura 14. A imagem ilustra as curvas características que exprimem os dados relativos ao método de dosagem apresentado. É possível, através destas, retirar os parâmetros necessários para uma dosagem otimizada do concreto.

Figura 14 – Exemplo de curvas de dosagem.



Fonte: Helene e Terzian (1993)

O parâmetro m estabelece a união proporcional entre os quantitativos dos agregados. Tem-se, por consequência:

$$m = a + p \quad (2)$$

Proporção:

$$1: m \rightarrow 1: a: p$$

O consumo de cimento pode ser calculado conforme as massas específicas dos materiais que integram a mistura de concreto e com base nas proporções dos agregados definidas conforme a riqueza do traço e o teor ideal de argamassa, além do fator água/cimento propício para o concreto trabalhado. Tem-se a expressão formulada abaixo:

$$C \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{1000 - \text{teor de ar}\%}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a/c}{\gamma_{\text{água}}} + \frac{a}{\gamma_{\text{areia}}} + \frac{p}{\gamma_{\text{brita}}}} \quad (3)$$

Onde:

- γ_c é a massa específica do cimento, em kg/m³;
- $\gamma_{\text{água}}$ é a massa específica da água, a qual vale 1 kg/m³;
- γ_{areia} é a massa específica da areia, em kg/m³;
- γ_{brita} é a massa específica da brita, em kg/m³;

2.5 ADERÊNCIA ENTRE CONCRETO E ARMADURA

Ao se tratar da aderência entre o concreto e o aço, parte-se do princípio que ambos os materiais possibilitem um funcionamento em conjunto. Entre então a aderência, a qual mede a solidariedade entre esses dois materiais, de maneira que seu trabalho, que ocorre de maneira simultânea, satisfaça as solicitações aplicadas num material composto por concreto e aço.

Conforme França (2004), a aderência garante as mesmas deformações específicas ocorrendo na armadura e no concreto que a envolve, sendo que essa solidariedade entre os materiais funcione mediante a ação de cargas. As tensões oriundas das solicitações atuantes na interface concreto/aço são classificadas como tensões de aderência, estas, podendo ser estimadas a partir de expressões normatizadas de cálculo de tensão, provenientes de ensaios executados ou de modelos matemáticos (FRANÇA, 2004).

Segundo Ducatti (1993), a aderência se trata de uma tensão de cisalhamento entre a superfície da barra de aço e o concreto que a circunscreve. Alguns autores costumam chamar de aderência à ligação existente entre o aço e o concreto que impede ou reduz o deslizamento entre eles (FRANÇA, 2004). É importante salientar que o deslizamento se trata da deformação típica analisada nos ensaios de aderência; esse escorregamento da barra de aço é causado pela deformação elástica do concreto. Porém, é possível se observar o esmagamento do concreto nas regiões de nervuras quando submetido à cargas maiores (FRANÇA, 2004).

É válido mencionar que as nervuras exercem papel intrínseco na aderência da interface entre o concreto e o aço. As barras lisas e as barras nervuradas exprimem comportamento diferentes quanto à aderência com o concreto. França (2004) traz que, nas barras com superfície lisa, a ruptura por arrancamento se dá, majoritariamente pela adesão química entre a pasta de cimento e a barra de aço. Ocorrida a perda da adesão química, surge uma nova resistência, que será devido ao atrito, que após o seu esgotamento, a barra desliza, de maneira

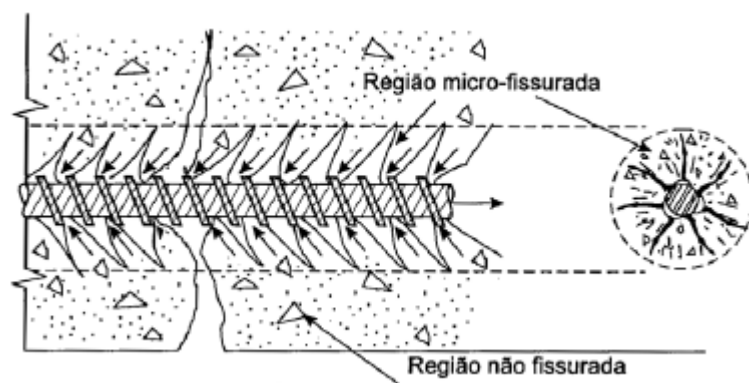
que não se verifica um fendilhamento ao longo de todo o contato do concreto com o aço. Observa-se, em contrapartida, uma lacuna deixada pela barra, no concreto.

Com relação às barras com nervuras, a parcela maior da aderência será atribuída às pressões que as nervuras exercem sobre o concreto, mais especificamente a adesão mecânica que ocorre pela formação das “engrenagens” na superfície de contato. Conforme França (2004), o efeito da adesão química é pequeno e a adesão por atrito não ocorre até que o escorregamento entre a barra e o concreto aconteça. De acordo com Ducatti (1993), a distinção entre as barras lisas e as barras nervuradas é que, para as últimas, as engrenagens formadas nas nervuras não são perdidas, e portanto apenas um fendilhamento geral pode finalizar o estágio da aderência mecânica.

Os modos de ruptura são um ponto fundamental na análise da aderência na interface aço/concreto. Segundo França (2004), o mecanismo de aderência entre o aço e o concreto vêm sendo fomentado desde a década de 40, dada a sua complexidade. Os ensaios práticos, bem como as teorias levantadas, vêm impulsionando os pesquisadores na tentativa de esclarecer o mecanismo, para que, então, alguns métodos e modelos possam servir de base na aplicação e no cálculo de estruturas.

Castro (2002) aponta que a ruptura relacionada à aderência está vinculada a um determinado estado de deformações e fissuração, de maneira que dois principais modos podem ser observados: ruptura por arrancamento e ruptura por fendilhamento. O primeiro modo de ruptura está relacionado ao desprendimento do concreto entre as nervuras, instigando o arrancamento da barra. O segundo modo ocorre quando os esforços de tração promovem um fendilhamento longitudinal do concreto, em direção às bordas do corpo-de-prova (CASTRO, 2002).

Fusco (1995) relata que, apesar do primeiro modo de ruptura ser caracterizado pelo arrancamento da barra de aço do concreto, ainda existe uma região de microfissuras na interface, vide a mobilização de esforços de aderência. Portanto, a barra só irá se desprender quando todo o concreto circunvizinho estiver desgastado. A figura 15 representa essa região de microfissuras.

Figura 15 – Microfissuração do concreto na interface concreto/aço.

Fonte: Fusco (1995).

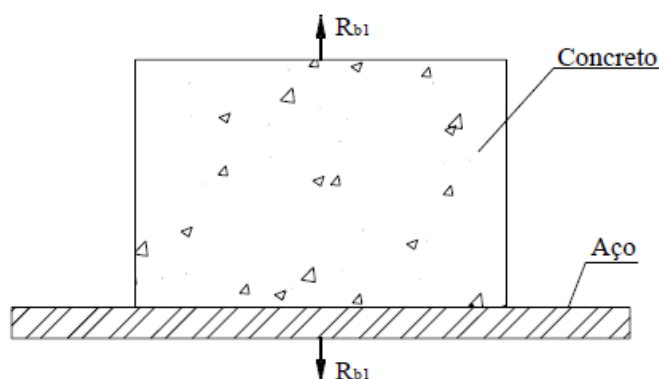
2.5.1 Tipos de aderência

Uma série de condicionantes podem intervir na ligação entre o aço e o concreto. A solidarização da armadura à matriz é garantida pela aderência entre os dois materiais. A aderência é composta por várias parcelas as quais decorrem de diferentes fenômenos que intervêm na ligação do concreto com o aço (DUCATTI, 1993; FUSCO, 1995; CASTRO, 2002 ; FRANÇA, 2004). Conforme Fusco (1995), três tipos de aderência podem ser observados, e, conforme a interface analisada entre o concreto e a barra de aço, existirá a preponderância de uma das tipologias na resistência ao arranque do vergalhão.

2.5.1.1 Aderência por adesão

A adesão é a aderência química que surge durante as reações de pega do cimento em decorrência das ligações físico-químicas na interface de ambos os materiais: aço e concreto. (CASTRO, 2002). A aderência depende da limpeza da superfície e da rugosidade das barras, o que não é suficiente para uma boa aderência, pois é destruída no caso de pequenos deslocamentos da barra (FRANÇA, 2004).

Fusco (1995) exprime uma resistência R_{b1} caracterizada pela separação de um bloco concretado diretamente sobre uma chapa de aço. Essa separação dos materiais é representada por deslocamentos iniciais e muito pequenos. Tal disposição é ilustrada pela figura 16:

Figura 16 – Aderência por adesão.

Fonte: Fusco (1995).

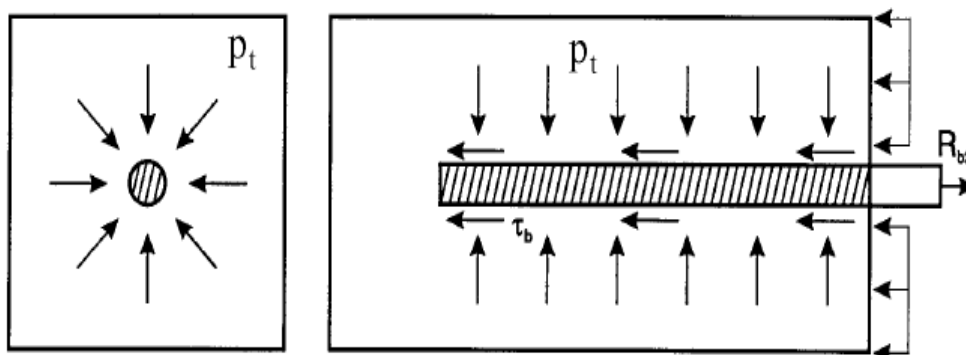
2.5.1.2 Aderência por atrito

Esse tipo de aderência retrata uma possível aparição de um deslocamento relativo entre o aço e o concreto. Conforme Castro (2002), a contribuição do atrito na resistência de aderência tem maior importância nas barras lisas.

A retração no concreto imprime uma pressão transversal ao vergalhão de aço. Uma vez que a barra de aço limita as deformações decorrentes do concreto, surge, automaticamente, uma pressão transversal exercida pelo concreto sobre a barra. A presença de confinamento e de compressão transversal externa, usualmente encontrada nos apoios diretos das vigas, aumenta essa parcela de aderência (CASTRO, 2002).

Uma maneira de quantificar a aderência por atrito é através dos ensaios de arrancamento. Segundo Fusco (1995), existe uma força R_{b2} relativamente superior à força de aderência por adesão R_{b1} . A avaliação por meio de ensaios denota que a adesão por atrito predomina conforme o deslizamento da barra de aço. A figura 17 ilustra a distribuição de tensões nos dois materiais.

Figura 17 – Aderência por atrito.

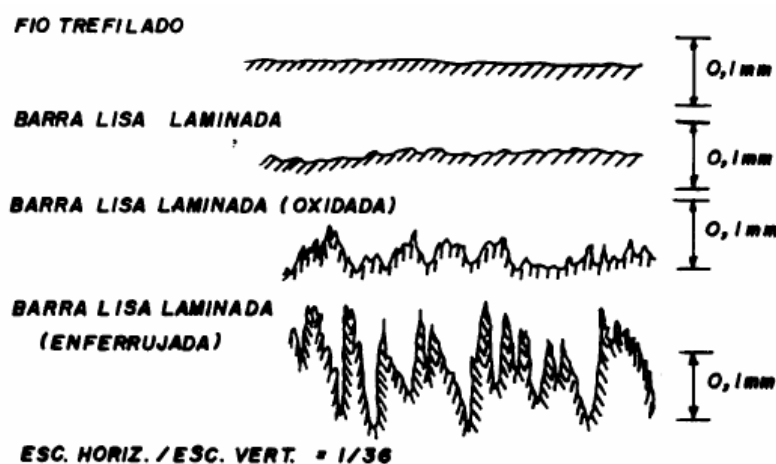


Fonte: Fusco (1995).

2.5.1.3 Aderência mecânica

Esse tipo de aderência é observado de acordo com a superfície das barras de aço em estudo. Nas barras nervuradas, a aderência mecânica é a principal responsável pela solidariedade das barras ao concreto (CASTRO, 2002). Através de intertravamento mecânico, do tipo de encaixe entre o concreto e as nervuras das barras de aço, formam-se “consoles de concreto” que são solicitados ao corte e à compressão antes que a barra possa deslizar no concreto (FRANÇA, 2004). O acabamento superficial das barras lisas também constitui um parâmetro para a análise da aderência mecânica. A rugosidade dessa barra é ilustrada por Fusco (1995):

Figura 18 – Rugosidade das barras lisas.



Fonte: Fusco (1995).

2.5.2 Fatores que influenciam no comportamento quanto à aderência

A aderência entre o aço e o concreto será descrita pela avaliação de inúmeros fatores, de caráter físico e mecânico, os quais interferem nas ancoragens propriamente ditas, em termos de resistência e ductilidade. As peças estruturais devem ser analisadas tanto em serviço quanto numa situação última de colapso.

O Código Modelo CEB-FIB (1990) levanta uma distinção entre os fatores essenciais que influem na aderência. O primeiro grupo leva em consideração o comportamento local e o segundo relacionado à resposta global. Os fatores locais são decorrentes da própria posição da concretagem da peça estrutural. No que diz respeito aos fatores globais, trabalha-se diretamente com a região de ancoragem, na qual inúmeros condicionantes relacionados ao confinamento da barra irão influenciar na aderência.

Castro (2002) enumera os principais fatores, de caráter global e local, que interferem na aderência entre o aço e o concreto:

Figura 19 – Fatores que influenciam no comportamento de aderência.

Local	Global	Fatores
	X	Propriedades mecânicas do concreto
	X	Conformação superficial da barra de aço
	X	Classe do aço
	X	Tensão de escoamento do aço
	X	Número de barras em uma mesma camada
X		Inclinação das barras durante a concretagem
X		Posição das barras na seção de concreto durante a concretagem
	X	Cobrimento e espaçamento das barras da armadura
	X	Quantidade e posição da armadura transversal
X		Comprimento de ancoragem
X		Tipo, velocidade e duração do carregamento

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Existem alguns fatores que, devido à sua importância, merecem um direcionamento mais específico. A resistência mecânica do concreto é um dos fatores que influencia de maneira mais significativa a resistência de aderência. De modo geral, quanto maior a

resistência mecânica do concreto, maiores serão os esforços de aderência que o concreto poderá suportar na interface aço-concreto (FRANÇA, 2004).

A retração do concreto faz surgir tensões de compressão transversais na armadura longitudinal. Uma vez que o concreto é impedido de se deformar na região da barra de aço, surgem tensões nessa região. Procedendo com o equilíbrio, as tensões de compressão criam tensões de tração longitudinal na região de ancoragem da armadura, aumentando o efeito de fendilhamento decorrente das forças de ancoragem havendo a possibilidade de diminuição da tensão de aderência última (CASTRO, 2002).

O diâmetro da barra não apresenta visíveis distinções no que faz referência à tensão de aderência. Entretanto, alguns autores observaram que diferentes diâmetros podem fornecer diferentes resistências à aderência. Conforme alguns autores, há uma diminuição na tensão de aderência à medida que o diâmetro da barra de aço aumenta. Ducatti (1993) observou essa diminuição de aderência, justificando através de uma possível zona de transição maior nas barras de maior diâmetro.

Por outro lado, alguns pesquisadores verificam um aumento na tensão de aderência em vergalhões de maior diâmetro. Neste caso, a conformação superficial das barras em estudo deve ser analisada, em especial as engrenagens mecânicas (nervuras transversais) que são formadas nas barras de aço com nervuras. Outro fator importante é o estado de oxidação da barra, o qual interfere diretamente na superfície de contato entre o concreto e o aço (FUSCO, 1995).

2.5.3 Ensaios de Aderência

Os ensaios para avaliação da aderência seguem a normatização dos ensaios de arrancamento. Usualmente, a ancoragem das barras de aço no concreto será analisada através de curvas força de tração x deslizamento, ou ainda, tensão de tração x deslizamento. Essas grandezas são quantificadas na extremidade livre da barra, conforme a configuração de cada ensaio.

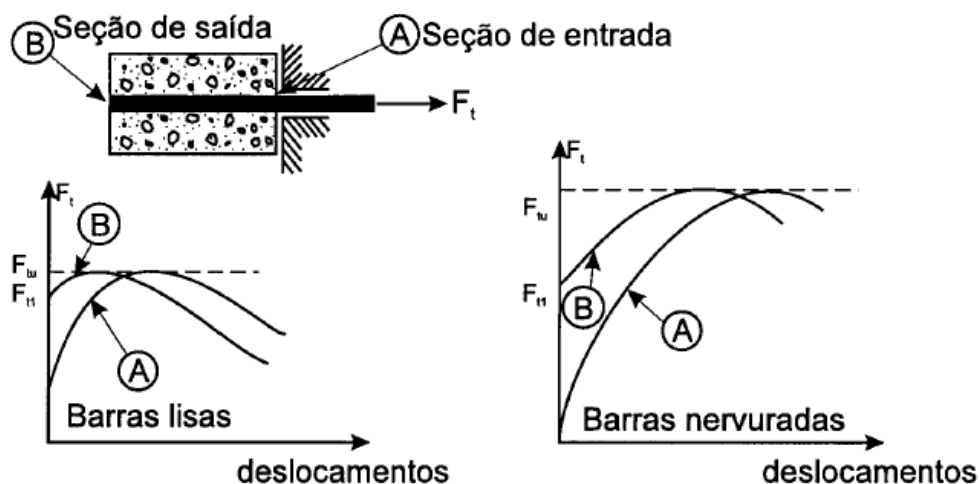
Os cobrimentos e os comprimentos de ancoragem são fixados inicialmente. Segundo Castro (2002), alguns cobrimentos de concreto eram definidos com maior espessura para inibir a aparição do fendilhamento. Costuma-se utilizar as mesmas condições de confinamento para os diferentes diâmetro em análise.

Os dados finais dos ensaios de arrancamento são dados conforme valores médios da iminência do deslizamento da barra (amostragem considerada), valores estes que serão

definidos como a tensão de aderência entre o concreto e o aço. Após o arranque, diz-se que a barra transferiu toda a tensão atuante nela para o concreto (CASTRO, 2002).

Fusco observou o comportamento das curvas para as barras lisas e barras nervuradas, conforme a figura 20.

Figura 20 – Cuvras de aderência – barras lisas e nervuradas.



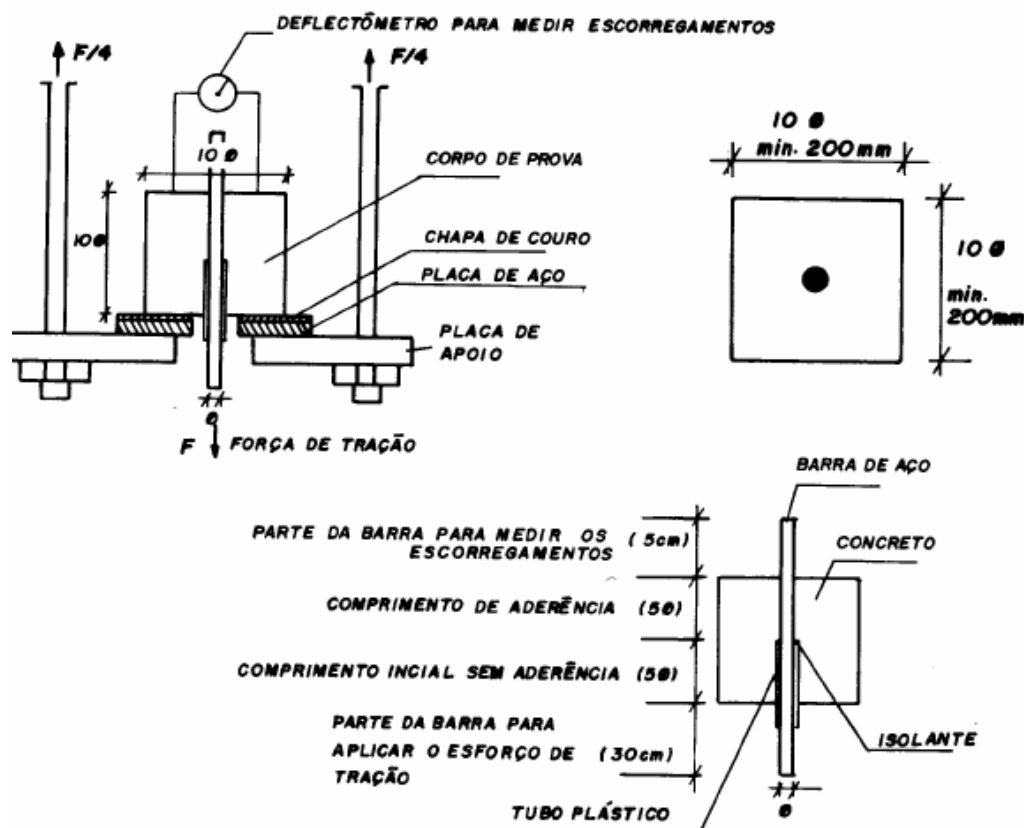
Fonte: Fusco (1995).

Desde o princípio foram observados deslocamentos da seção inicial A, porém, mediante a aplicação uma força F_{t1} o escorregamento de toda barra acontece. Iniciado esse escorregamento, a força de aderência ainda pode aumentar, e esse aumento é maior para as barras com nervuras superficiais. Esse fato se justifica por esse tipo de barra possuir maior capacidade de mobilização da aderência mecânica (CASTRO, 2002; FUSCO, 1995).

2.5.3.1 Ensaio de Arrancamento PULL-OUT TEST

Ensaio normatizado pela CEB-FIB RC6 (1983), definido como um corpo-de-prova cúbico de concreto com uma barra de aço transpassando longitudinalmente no centro. A barra é “arrancada” do componente cúbico por meio da tração no lado de contato com a placa de apoio. O deslocamento da barra é medido na extremidade descarregada. A figura abaixo ilustra os aparatos e a configuração geral do ensaio.

Figura 21 – Ensaio de Arrancamento PULL-OUT TEST.



Fonte: RILEM-CEB-FIB-RC6 (1983).

Parâmetros como resistência padrão para o concreto moldado, velocidade de carregamento (aplicação da força de tração), formato do corpo-de-prova são de extrema relevância para o alcance de resultados eficientes. Na utilização de vários diâmetros de barras de aço, uma padronização desses fatores mencionados deve ser conduzida de maneira que não haja variabilidades indesejadas.

O formato do corpo-de-prova de concreto pode apresentar, também, o formato cilíndrico. Conforme Carvalho *et al.* (2018), o pull-out test feito com a forma cilíndrica apresentou melhores resistências à aderência se comparado com o realizado com formas cúbicas. Essa constatação se deu para os diâmetros de 8mm e 10mm. Em acréscimo, as amostras cilíndricas apresentam uma facilidade em termos de manuseio, visto que são menores que as cúbicas e conseqüentemente facilitam a performance do ensaio.

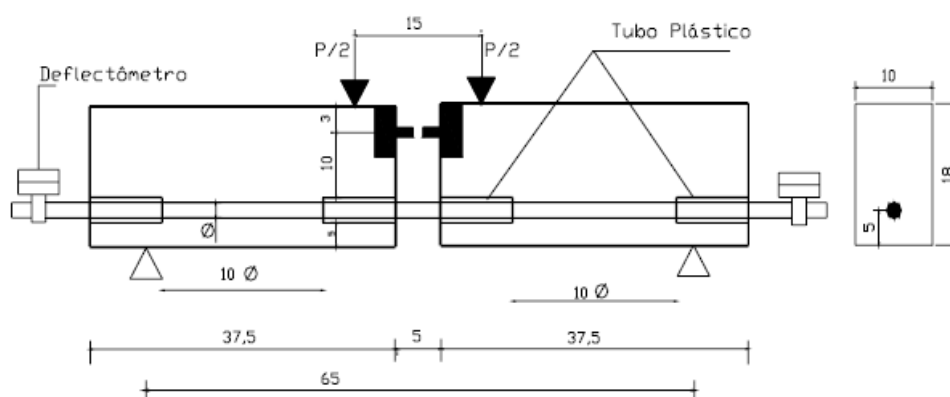
2.5.3.2 Ensaio de Arrancamento PUSH-OUT TEST

Esse ensaio de assemelha ao ensaio de arrancamento PULL-OUT TEST, entretanto, a barra contida no corpo-de-prova de concreto é comprimida.

2.5.3.3 Ensaio de Flexão BEAM-TEST

Ensaio normatizado pela CEB-FIB RC5 (1982), o “Beam Test” consiste em um corpo de prova constituído de dois blocos paralelepípedicos, ligados em sua parte inferior pela barra de aço destinada ao estudo de aderência e em sua parte superior por uma rótula metálica. A viga assim constituída é solicitada a flexão simples, sobre dois apoios, por duas forças concentradas de mesma magnitude que agem a distâncias iguais dos extremos. Nos extremos das barras colocam-se deflectômetros, a fim de que possam ser medidos os deslocamentos relativos da barra em relação ao concreto. A ancoragem é limitada ao comprimento especificado, com a ajuda de tubos plásticos que eliminam a aderência nos trechos desejados.

Figura 22 – Ensaio de Flexão BEAM-TEST.



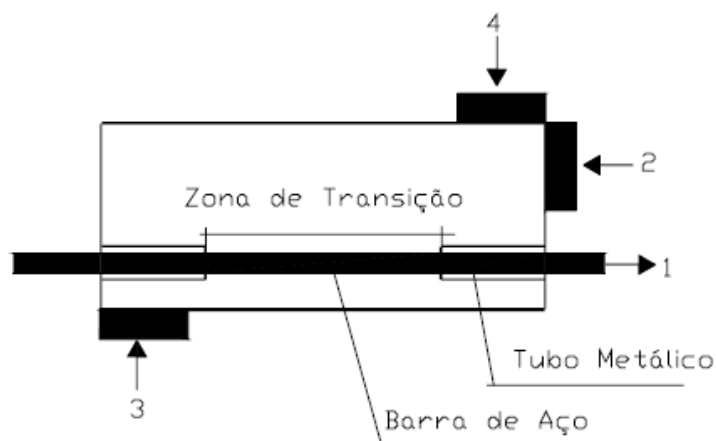
Fonte: França (2004).

2.5.3.4 Ensaio de Extremo de Viga BEAM END TEST

O ensaio consiste numa adaptação do tradicional PULL-OUT TEST, de forma a apresentar o levantamento do gradiente de deformação ao longo da altura do corpo-de-prova. De maneira sintetizada, o ensaio consiste no tracionamento da barra situada na parte inferior da amostra, surgindo, por meio da reação à esse esforço induzido, uma zona de compressão na

parte superior da viga, a qual também é aplicada ao corpo-de-prova (FRANÇA, 2004). O ensaio é descrito pela figura 23.

Figura 23 – Ensaio de Flexão BEAM END TEST.



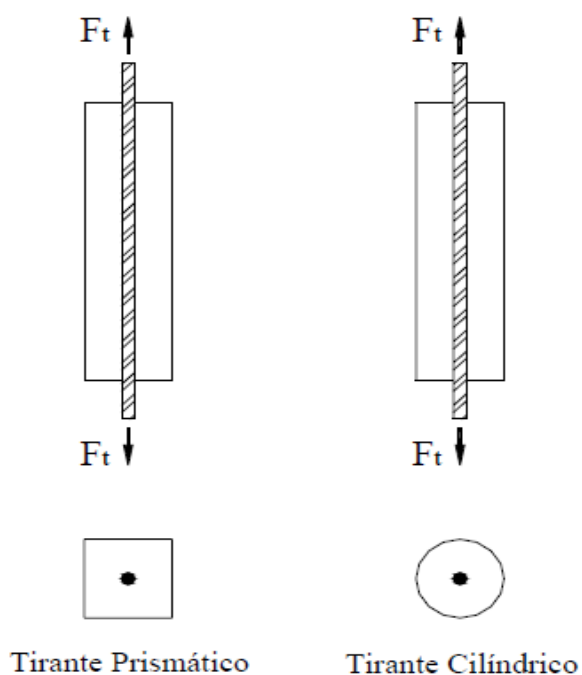
- 1- Força de tração na barra;
- 2- placa de reação que simula a zona de compressão de viga;
- 3- placa de reação de apoio;
- 4- placa de reação que simula o esforço cortante que seria transmitido através do concreto.

Fonte: França (2004).

2.5.3.5 Ensaio de Tirante

O ensaio consiste em aplicar cargas de tração opostas entre si, nas duas extremidades livres de uma barra de aço envolvido por concreto. Castro (2002) e França (2004) afirmam que uma variedade de autores dizem que o ensaio reproduz as condições reais das solicitações impostas. O ensaio é descrito pela figura 24.

Figura 24 – Ensaio de Tirante.

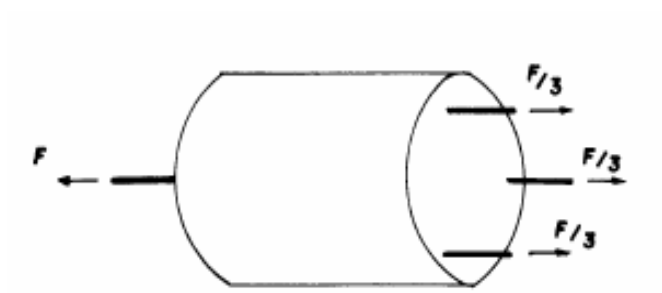


Fonte: Castro (2002).

Em contrapartida, o ensaio apresenta um grade empecilho, sendo o aparecimento de fissuras que não se desenvolvem linear nem perpendicularmente à linha média do tirante, bem como não apresentam abertura regular (CASTRO, 2002). A NBR 7477/1982 estabelece que a determinação do coeficiente de conformação superficial deve ser feita através de ensaios de fissuração em tirantes de concreto armado com uma só barra ou fio. Esses tirantes devem ter seção transversal quadrada.

2.5.3.6 Ensaio das quatro barras

Trata-se de uma ensaio no qual uma barra central é tracionada do corpo-de-prova cilíndrico, e na extremidade oposta o cilindro é mantido imóvel pela reação originada da disposição em vértice de um triângulo de outras três barras de aço. O deslocamento da barra de aço central em relação ao concreto é coletado pelos medidores de deformação, usualmente os extensômetros colados na parte interna (contato) do aço. A figura 25 ilustra esquematicamente a disposição das barras no cilindro de concreto.

Figura 25 – Ensaio das quatro barras.

Fonte: França (2004).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do trabalho será apresentada conforme dois grandes tópicos. O primeiro fornecerá a descrição dos materiais utilizados na elaboração dos concretos. O segundo irá tratar dos procedimentos experimentais e aparatos utilizados para a obtenção dos resultados.

3.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Cimento Portland

O aglomerante selecionado para a fabricação das amostras de concreto convencional, as que serão ditas de referência para efeito comparativo, foi o cimento CPV-ARI-Plus - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Trata-se do cimento com teor de adição mínimo, comparado às demais tipologias.

Visando a identificação das propriedades desse material, procedeu-se com os ensaios abaixo especificados pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT):

- Determinação da finura pelo Método de Blaine, segundo a NBRNM 76 (ABNT, 1998).
- Determinação do Tempo de Pega, pela NBRNM 65 (ABNT, 2003).
- Determinação da Massa específica, pela NBRNM 23 (ABNT, 2001).
- Determinação da Resistência à compressão do cimento, pela NBR 7215 (ABNT, 1997).
- Determinação da Análise química, segundo a NBR 11578 (ABNT, 1997).
- Especificações para cimento de alta resistência inicial, segundo a NBR 5733 (ABNT, 1991).

A tabela 1 ilustra os resultados de caracterização do cimento CPV-ARI Plus, conforme as normas especificadas na metodologia.

Tabela 1 – Propriedades físicas do cimento CPV-ARI.

Análise física do cimento Portland CPV ARI VOTORAN					
Referência			Especificações		
Amostra			03	NBR 5733	
				Min.	Máx.
Finura peneira 200 (% retida)			0,77	-	6
Finura peneira 325 (% retida)			1,87	-	-
Superf. espec. Blaine (cm²/g)			4377	3000	-
Densidade aparente (g/cm³)			1,02	-	-
Densidade absoluta (g/cm³)			3,14	-	-
Água de consistência da pasta		Gramas	158	-	-
		(%)	31,6	-	-
Início de pega (h:min)			3:03	1:00	-
Fim de pega (h:min)			4:46		
Expansão em auto-clave (%)			EXP	-	-
Resistência a Compressão Axial	Consistência	Gramas	158	-	-
		A / C	0,316	-	-
	Tensão (MPa)	03 dias	34,1	24	-
		07 dias	35,1	34	-
		28 dias	41,9	-	-

Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.1.2 Metacaulim HP Ultra

Material de origem argilosa, e portanto rico em silício e alumínio, que será utilizado com função aglomerante na mistura do concreto ativado alcalinamente. Tal composto terá função de precursor na matriz geopolimérica. O fabricante (Metacaulim do Brasil, 2017) classifica o metacaulim em questão como um material composto predominantemente de silicato de alumínio. Suas características físicas e químicas são descritas pela tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades químicas e físicas do metacaulim.

Propriedades METACAULIM HP ULTRA			
Propriedade Físicas	Resultado	Típico	Limite - NBR 15.894
Finura (<#325 - 44µm)	8,5%	5,0%	< 10,0%
Área Específica (BET, cm ² /g) - AE	225.000	230.000	> 150.000
Massa Específica (kg/dm ³) - ME	2,53	2,55	-
Massa Unitária (kg/dm ³) - MU	0,68	0,64	-
Propriedades Adicionais			
Chapelle Mod.: 900 mg Ca(OH) ₂ /g			
Propriedade Químicas - Elemento	Resultado	Típico	Limite - NBR 15.894
SiO ₂	59,5%	55,0%	44,0% a 65,0%
Al ₂ O ₃	32,2%	36,0%	-
Fe ₂ O ₃	2,2%	3,5%	-
TiO ₂	1,0%	0,7%	
CaO	0,3%	0,4%	CaO + MgO < 1,5%
MgO	0,1%	0,4%	
K ₂ O	1,8%	1,3%	0,658 K ₂ O + Na ₂ O < 1,5%
Na ₂ O	0,1%	0,2%	< 0,5%
SO ₃	0,3%	0,3%	< 1,0%
Perda ao fogo	2,5%	2,0%	< 4,0%

Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.1.3 Cinza da casca de arroz (CCA)

Obtida por encomenda da empresa HT NUTRI, trata-se de um material alternativo rico em silício altamente difundido no ramo da construção civil, com comercialização de unidades do material. Seu caráter pozolânico é intrínseco para a elaboração da matriz geopolimérica, uma vez que o mesmo entrará como fornecedor dos compostos inorgânicos no ativador alcalino. Levando em consideração a ausência do silicato de sódio no ativador alcalino, a CCA entra com sua riqueza de SiO_2 , a qual gira em torno de 90%. O silício é essencial para a formação dos compostos hidratados, e sua fonte será proveniente tanto do metacaulim (aglomerante da mistura) quanto de um dos componentes do ativador, que no caso é a CCA.

3.1.4 Soda cáustica (NaOH)

Material encomendado da empresa UNIPAR CARBOCLORO, em substituição ao silicato de sódio, a soda cáustica (formato sólido de pastilhas), combinada com um material de origem pozolânica, no caso a CCA, fornece uma composição aproximada em relação ao silicato. Portanto, uma análise desse ativador laboratorial é altamente plausível, levando em conta a exclusão de um composto industrial (silicato) cuja produção acarreta numa notória emissão de poluentes atmosféricos.

3.1.5 Agregados

O agregado miúdo utilizado no desenvolvimento do projeto foi a Areia Média Natural, proveniente do Porto Nossa Senhora Aparecida, de Andradina – SP. O agregado graúdo selecionado foi classificado como sendo uma Brita 1, proveniente da Pedreira Três Irmãos, de Andradina – SP.

Para a descrição das propriedades dos materiais acima apresentados, utilizou-se dos seguintes ensaios normativos:

- Composição granulométrica, pela NBRNM 248 (ABNT, 2003).
- Massa específica e massa específica aparente (areia), pela NBRNM 52 (ABNT, 2009).
- Absorção de água, pela NBRNM 30 (ABNT, 2001).
- Massa unitária, pela NBRNM 45 (ABNT, 2006).

- Massa específica e massa específica aparente (brita), seguindo as recomendações da NBRNM 53 (ABNT, 2009).

3.1.5.1 Agregado miúdo

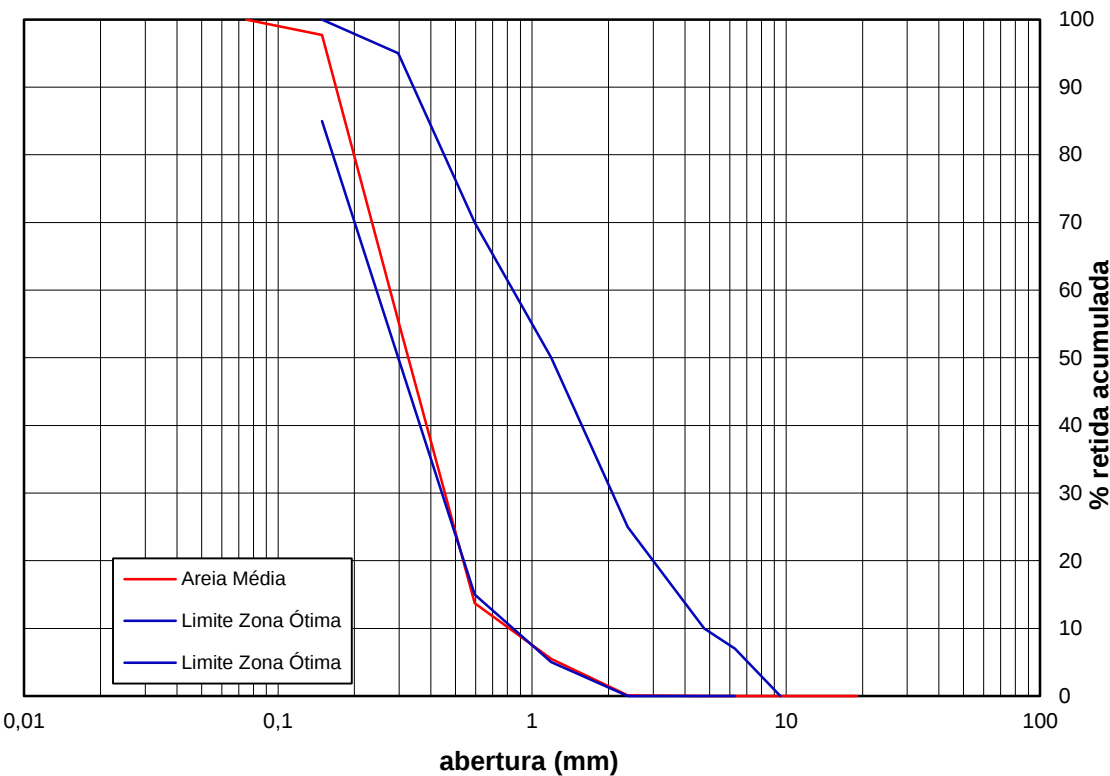
O agregado miúdo utilizado na confecção dos concretos mostrou o comportamento granulométrico ilustrado nas figuras 26 e 27:

Figura 26 – Ensaio de granulometria da areia media natural.

AREIA NATURAL													
PENEIRAS		Abert. mm	Peso Retido (g)	% Retida	% Acumulada		% Passando						
Normal	Auxil.												
3"	-	76,1		0,00	0,00		100,00						
-	2 1/2"	64		0,00		0,00	100,00						
-	2"	50,8		0,00		0,00	100,00						
1 1/2"	-	38,1		0,00	0,00		100,00						
-	1"	25,4		0,00		0,00	100,00						
3/4"	-	19		0,00	0,00		100,00						
-	1/2"	12,7		0,00		0,00	100,00						
3/8"	-	9,51	0	0,00	0,00		100,00						
-	1/4"	6,3	0	0,00		0,00	100,00						
N.º 4	-	4,76	0	0,00	0,00		100,00						
N.º 8	-	2,38	1,00	0,10	0,10		99,90						
N.º 16	-	1,19	54	5,40	5,50		94,50						
N.º 30	-	0,595	82	8,20	13,70		86,30						
N.º 50	-	0,297	418	41,80	55,50		44,50						
N.º 100	-	0,149	422	42,20	97,70		2,30						
Fundo	-	0,075	23	2,30		100,00							
Total			1000	100	1,73								
Peneiras (mm) →		% Retida Acumulada											
		0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,5	12,7	19,0	25,4
Areia Natural		100,00	97,70	55,50	13,70	5,50	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 27 – Curva granulométrica da areia média natural.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A tabela 3 fornece as propriedades físicas do agregado miúdo utilizado para a construção dos concretos.

Tabela 3 – Propriedades físicas da areia média natural.

Propriedade	Areia Média
Massa Unitária	1,62 g/cm³
Diâmetro máximo	2,36 mm
Módulo de finura	2,12
Massa específica aparente	2,58 g/cm³
Massa específica seca	2,65 g/cm³
Massa específica SSS	2,63 g/cm³
Absorção	0,34%
Material Pulverulento	0,86%

Fonte: Elaboração do próprio autor.

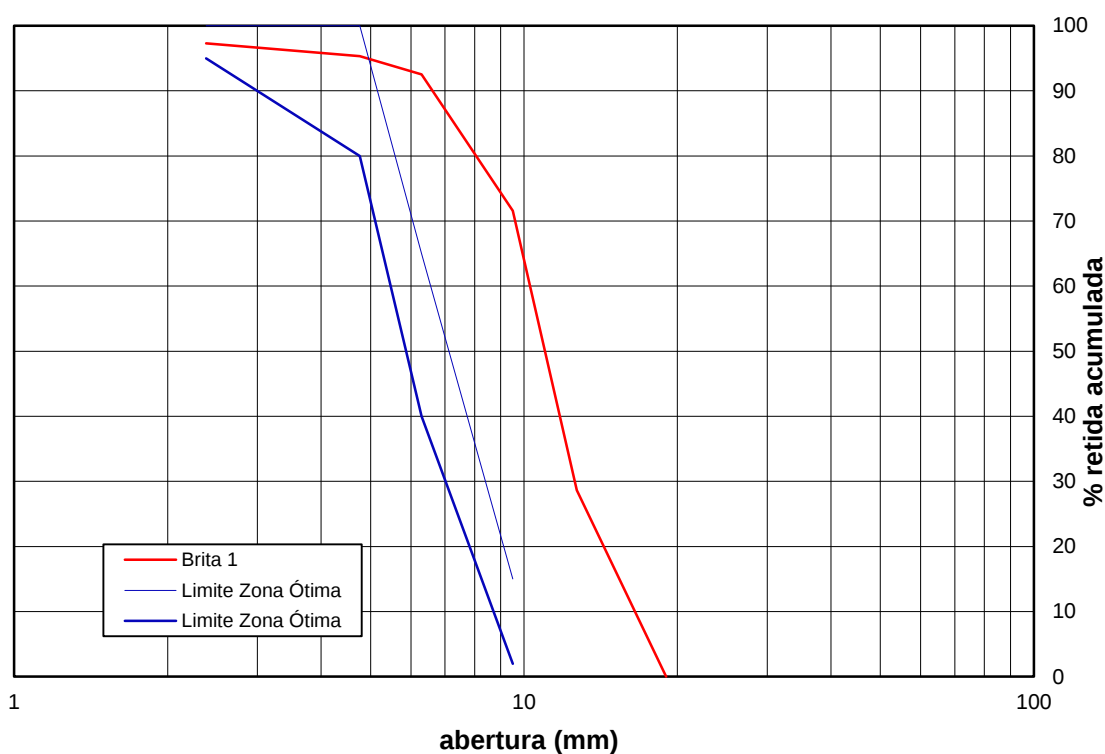
3.1.5.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado na confecção dos concretos mostrou o comportamento granulométrico evidenciado nas figuras 28 e 29:

Figura 28 – Ensaio de granulometria da brita 1.

BRITA 1													
PENEIRAS		Abert. mm	Peso Retido (g)	% Retida	% Acumulada		% Passando						
Normal	Auxil.												
3"	-	76,1	0,00	0,00	0,00		100,00						
-	2 1/2"	64	0,00	0,00		0,00	100,00						
-	2"	50,8	0,00	0,00		0,00	100,00						
1 1/2"	-	38,1	0,00	0,00	0,00		100,00						
-	1"	25,4	0,00	0,00		0,00	100,00						
3/4"	-	19	0,00	0,00	0,00		100,00						
-	1/2"	12,7	2850,00	28,63		28,63	71,37						
3/8"	-	9,51	4275,00	42,94	71,57		28,43						
-	1/4"	6,3	2085,00	20,94		92,52	7,48						
N.º 4	-	4,76	280,00	2,81	95,33		4,67						
N.º 8	-	2,38	195,00	1,96	97,29		2,71						
N.º 16	-	1,19	75,00	0,75	98,04		1,96						
N.º 30	-	0,595	35,00	0,35	98,39		1,61						
N.º 50	-	0,297	25,00	0,25	98,64		1,36						
N.º 100	-	0,149	35,00	0,35	99,00		1,00						
Fundo	-	0,075	100,00	1,00		100,00							
Total			9955,00	100	6,58								
Peneiras (mm) →		% Retida Acumulada											
		0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,5	12,7	19,0	25,4
Brita 1		100,00	99,00	98,64	98,39	98,04	97,29	95,33	92,52	71,57	28,63	0,00	0,00

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 29 – Curva granulométrica da brita 1.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A tabela 4 fornece as propriedades físicas do agregado graúdo utilizado para a construção dos concretos.

Tabela 4 – Propriedades físicas da brita 1.

Propriedade	Brita 1
Massa Unitária	1,60 g/cm ³
Diâmetro máximo	19 mm
Módulo de finura	6,91
Massa específica aparente	3,00 g/cm ³
Massa específica seca	2,89 g/cm ³
Massa específica SSS	2,93 g/cm ³
Absorção	1,95%
Material Pulverulento	1,25%

Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.1.6 Água de amassamento

A água para confecção das amostras foi utilizada diretamente do sistema de abastecimento de água de Ilha Solteira.

3.1.7 Enxofre puro (Fornecedor - Labsynth)

Material cuja características são: pó fino, amarelado, com leve odor próprio, com teor mínimo de 99,84%. O capeamento dos corpos-de-prova é intrínseco para uma correta avaliação das propriedades dos concretos. O material utilizado se trata do enxofre puro, o qual é submetido à temperaturas da ordem de 120°C para a regularização dos corpos-de-prova.

A regularização dos corpos-de-prova será feita conforme as recomendações da NBR 5738:2003, a qual especifica as condições de moldagem, adensamento, cura e retificação/capeamento para posterior ensaios de resistência.

3.1.8 Barras de aço

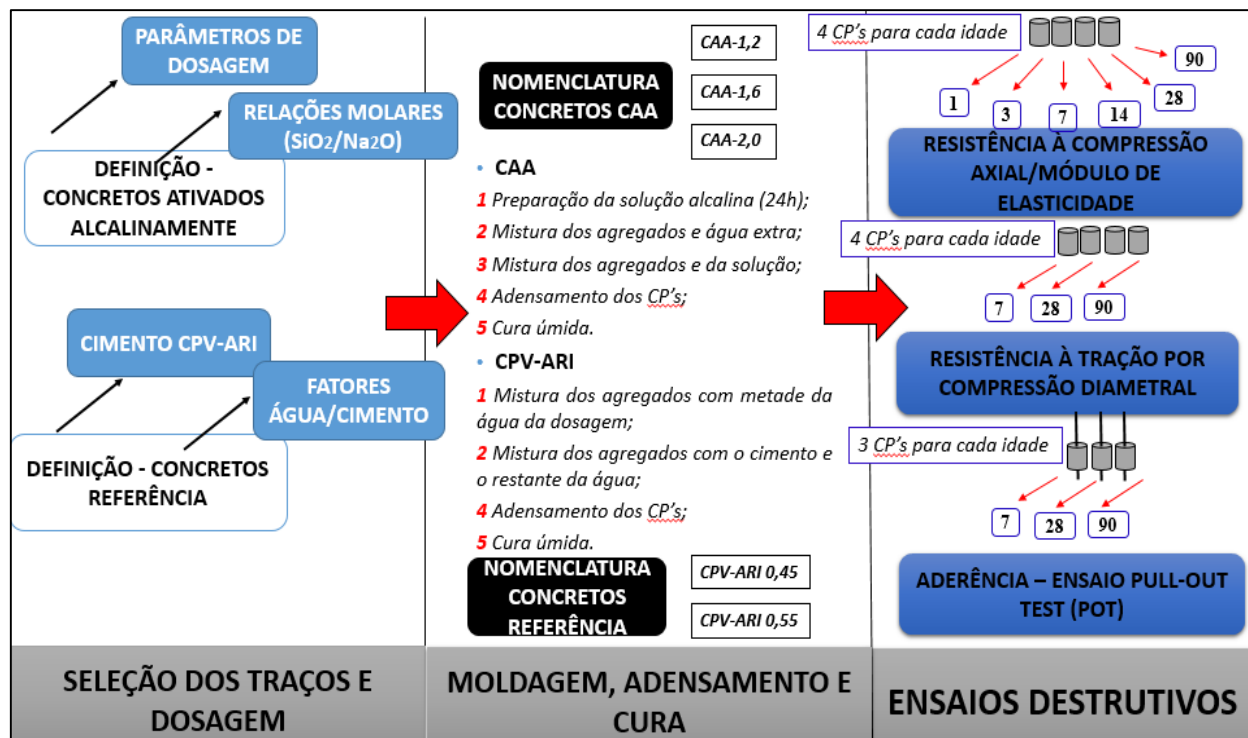
As barras de aço **nervuradas** serão utilizadas para avaliar o comportamento da interface dos concretos com relação à aderência. Dois diâmetros serão avaliados: **5mm (CA-60) e 8mm (CA-50)**. Para efeito de caracterização dos vergalhões, utilizou-se o seguinte ensaio de tração especificado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- Ensaio de tração segundo a NBR 7480 (ABNT, 2007). Com o ensaio, é possível retirar o módulo de elasticidade longitudinal e a tensão de escoamento do aço.

3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

De forma a oferecer uma visão geral do que foi desenvolvido, a figura 30 ilustra resumidamente todas as etapas do trabalho, desde a atribuição dos melhores traços até os ensaios programados para a avaliação das propriedades dos concretos.

Figura 30 – Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os detalhes referentes às três etapas centrais do trabalho serão abordados com mais detalhes na sequência. De início, será apresentado um panorama geral do trabalho, com algumas informações essenciais para o desenvolvimento dos concretos. Em seguida, a dosagem referente às amostras serão descritos, em especial a seleção das tipologias dos concretos ativados alcalinamente (CAA), com alguns parâmetros previamente analisados em outros trabalhos e utilizados como ponto de partida. Um detalhamento dos processos de adensamento e cura também será exposto, fechando a metodologia com a descrição dos ensaios, aparatos e posterior tratamento dos dados obtidos.

3.2.1 Panorama geral

A metodologia geral do trabalho será pautada em dois grupos de concretos, estes sendo instrumentos de análise posterior. Tomando como ponto central o estabelecimento de comparativos e pontos de proximidade entre dois grupos distintos de concretos, é de extrema relevância detalhar o processo de dosagem de ambos os compósitos.

A fabricação das amostras de concreto ativado alcalinamente compõe-se de duas etapas: a primeira sendo a preparação do ativador ($\text{CCA} + \text{NaOH} + \text{H}_2\text{O}$), este sendo elaborado com 24 horas de antecedência ao amassamento do concreto. A preparação prévia do ativador é devido à necessidade da dissolução da sílica, a qual se encontra presente na cinza da casca-se-arroz (BOUZÓN, *et al.*, 2014; ZHANG, *et al.*, 2017).

Passado um dia da mistura prévia dos materiais que integram o ativador alcalino, há a subsequente mistura destes com o aglomerante (metacaulim), e o efetivo amassamento do material, com a inclusão dos agregados à mistura. Em relação aos concretos convencionais, mantém-se o padrão especificado em norma, e conforme a dosagem, as amostras são construídas. Um intuito primordial do projeto foi manter o mesmo parâmetro de riqueza (cimento:agregados) para as duas tipologias de concreto (1:3,5), e fatores água/cimento próximos, conforme a trabalhabilidade estudada previamente.

Em termos de dosagem, os tipos de misturas trabalhadas carregam procedimentos com distinções claras. Com relação ao concreto ativado alcalinamente, vários parâmetros básicos precisam ser estabelecidos, além dos gerais, estes sendo: fator água/cimento, proporção entre aglomerante e agregados, dentre outras; além destes, outros parâmetros, ditos químicos, essenciais para a dosagem, necessitam de análise prévia, sendo: molalidade, relação molar entre os óxidos SiO_2 e Na_2O , quantitativo dos materiais recorrentes nas pozolanas (silício e alumínio), nos materiais utilizados para compor a mistura. Tais matrizes terão identificação CAA - (respectivo parâmetro de dosagem). No que diz respeito aos concretos referência, a dosagem segue o estabelecido pelo método do IPT/EPUSP Helene & Terzian, sendo que almeja-se do concreto dosado uma resistência à compressão na faixa entre 25 e 35 MPa, aos sete dias de idade. Para identificação, será utilizada a nomenclatura CPV-ARI para os concretos referência, seguida de seu fator água/cimento.

De posse dos corpos de prova referentes a cada grupo, procede-se com os ensaios destrutivos para a avaliação das propriedades estruturais destes. São elas: resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão axial em concomitância com o módulo de elasticidade e aderência entre o concreto e o aço (ensaio de arrancamento).

3.2.2 Dosagem dos concretos ativados alcalinamente (CAA) e dos concretos convencionais

Os concretos ativados alcalinamente (CAA) apresentam uma grande particularidade no seu procedimento de dosagem dos materiais. Existe a consideração de parâmetros estequiométricos para estabelecimento de cada proporção em específico. É mister iniciar a abordagem citando dois óxidos intrínsecos no tratamento desse tipo de matriz. São eles: SiO_2 e Na_2O . O parâmetro que terá variabilidade é justamente a relação molar destes dois elementos; esse parâmetro, ξ , pode variar de 0 até em torno de 2,4, considerando as proporções ótimas testadas na matriz de argamassa. É válido ressaltar que essas relações são provenientes do valor $\xi = 1,2$ no qual, em termos de massa, resultam em iguais quantidades em massa de CCA e NaOH. Portanto, um incremento para $\xi = 1,6$ nos indica que houve um acréscimo do óxido SiO_2 .

Tal variante será a distinção entre as tipologias de CAA que serão avaliadas. O valor de ξ exprime a relação molar entre os óxidos SiO_2 e Na_2O . O primeiro é proveniente do hidróxido de sódio, o qual constitui parte do ativador. Uma vez que trabalha-se, de início, com uma relação em mols dos óxidos, os pesos moleculares serão intrínsecos para a coleta posterior dos valores em massa dos materiais. Da mesma forma para o óxido de silício, este presente, num percentual próximo aos 90%, na CCA, deverá ser feita uma conversão de mols para massa, também utilizando-se do peso molecular do SiO_2 .

A variação proposta de 0,4 é para a obtenção do valor $\xi = 0$, que denota a não inclusão da CCA na elaboração do ativador alcalino. As proporções 0, 0,4 e 0,8 se mostram ineficientes para o tipo de matriz proposta, já que seus resultados demonstram resistências muito abaixo do intervalo de 25 a 30 MPa almejado. Seguindo essas mesmas proporções, a moldagem é possível, porém as amostras resultam em componentes com baixa resistência. Conforme Avila (2018), os teste de resistência realizados nas argamassas geopoliméricas reforçam tal afirmativa, com valores no entorno de 5,7 MPa para $\xi = 0$, aos 28 dias, de 6,9 MPa para $\xi = 0,4$, também aos 28 dias, e de 27 MPa para $\xi = 0,8$ (28 dias). Existe uma possibilidade da relação molar $\xi = 0,8$ fornecer resistências plausíveis, entretanto, viu-se maior viabilidade em iniciar a análise com a relação molar $\xi = 1,2$.

O precursor (metacaulim) da matriz geopolimérica será o parâmetro inicial que fornecerá o volume de CAA final. Constatou-se que são necessárias **680 gramas do precursor para gerar um volume de CAA de 1,6 litros**, o qual se aproxima do volume característico do corpo-de-prova com altura de 20 centímetros e diâmetro de 10 centímetros.

Essa proporção foi definida através de moldagens iniciais de corpos-de-prova, de maneira que partindo-se de uma massa específica de metacaulim, tem-se as demais massas dos materiais, e com o amassamento do concreto, faz-se o levantamento do número de corpos-de-prova moldados.

Com relação ao ativador, cuja composição não traz o silicato de sódio industrial, terá as massas da CCA (cinza da casca de arroz) e do NaOH (soda cáustica) conforme o parâmetro ξ . A quantidade de água da mistura será determinada de acordo com as proporções geradas mediante os cálculos estequiométricos e a molalidade estabelecida para a confecção das amostras. A literatura traz que os valores ideais para a molalidade estão na faixa de 6 a 10M. Para o trabalho em questão, o valor de maior coerência foi o de 8M. Esse valor foi submetido à análise por Avila (2018), com a constatação do molar (mols de soluto pela massa do solvente), de maneira que para as argamassas geopoliméricas constituídas pelos mesmo aglomerante e pelos mesmos materiais constituintes do ativador, o valor de 8M trouxe os melhores compósitos, em termos de trabalhabilidade e possibilidade de adensamento.

A molalidade permite a retirada, em valores de massa, dos materiais utilizados na construção dos CAA's. Considerando o peso molecular dos óxidos SiO_2 e Na_2O , e levando em consideração o fato destes componentes serem a base da CCA e da soda cáustica, respectivamente, é possível levantar os quantitativos desses materiais.

A preparação dos concretos ativados alcalinamente solicita confecção prévia (24 horas de antecedência) do ativador. O recipiente térmico usado comporta um volume limite de 4,71 litros de CAA. Tal volume foi constatado através de testes com massas dos quantitativos cujo volume era superior a 4,71 litros, acarretando no comprometimento dos recipientes térmicos uma vez que a reação que ocorre entre os materiais é de caráter exotérmica, com expansão volumétrica natural do recipiente.

Em relação aos agregados, a traço foi fixado na proporção 1:1,25:2,25, em que o metacaulim (aglomerante) fornece o parâmetro inicial para a determinação dos demais quantitativos. O fator água/aglomerante foi padronizado no valor de 0,6, este com origem em testes empíricos de argamassas geopoliméricas para a avaliação da melhor amostra em termos de trabalhabilidade e possibilidade de fabricação dos corpos de prova. É importante garantir que os agregados ocupem mais de 70% da massa total da matriz de concreto CAA.

Conforme a dosagem própria especificada, a tabela 5 traz os valores percentuais dos componentes para a confecção dos concretos. Em conjunto com os parâmetros de dosagem dos concretos CAA, a tabela 5 também fornece as proporções dos concretos convencionais, cuja dosagem foi procedida conforme as recomendações de Helene e Terzzian (1993). Uma

vez que o aglomerante para as matrizes é o metacaulim, é a partir dele que a dosagem se procede, com a determinação do restante dos materiais. As massas e os respectivos volumes arbitrários de CAA são definidos conforme as proporções apresentadas.

Tabela 5 – Proporção dos materiais para a dosagem dos CAA's e concretos referência.

Amostra	Aglomerante	Relação Molar	Aglomerante:água:areia:brita –	Molalidade (mol SiO ₂ /kg -água)
		$\xi = \text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$	Relação em Massa	
CAA-1,2	100% MK	1,2	1:0,6:1,25:2,25	8
CAA-1,6	100% MK	1,6	1:0,6:1,25:2,25	8
CAA-2,0	100% MK	2,0	1:0,6:1,25:2,25	8
CPV-ARI 0,45	100% CPV-ARI	-	1:0,45:1,25:2,25	-
CPV-ARI 0,55	100% CPV-ARI	-	1:0,55:1,25:2,25	-

Nota: MK se trata da nomenclatura referente ao Metacaulim.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O correspondente a um quilograma de metacaulim fornece, em termos de volume, aproximadamente 2,5 litros de concreto ativado alcalinamente, seguindo a dosagem especificada. Uma análise primária da tabela 5 concretiza, em termos percentuais, as relações estabelecidas entre o aglomerante e os agregados e a água de amassamento. Os componentes base para o ativador alcalino se relacionam, de maneira estequiométrica, conforme o parâmetro ξ , sendo convertidos em massa conforme seus pesos moleculares e a molalidade definida para as dosagens.

3.2.3 Volume de concreto totalizado

Os concretos ativados alcalinamente (CAA) terão o cimento substituído de maneira integral. Os três grupos de CAA são: CAA – 1,2, CAA – 1,6 e CAA – 2,0, todos apresentando o mesmo procedimento de dosagem, com diferenciação na quantidade de cinza da casca de arroz (CCA) que é inserida na matriz. De maneira análoga, os concretos referência, com distinção no fator água cimento, terão a mesma amostragem. Com o intuito de verificar as propriedades dos concretos dosados e pensando na amostragem para melhor interpretação dos resultados, estimou-se o seguinte volume para os concretos referentes ao trabalho:

Tabela 6 – Volume de concreto para as tipologias trabalhadas.

Amostra	Compressão Axial/Módulo (L)	Compressão Diametral (L)	Arrancamento (L)
CAA-1,2	38	19	30
CAA-1,6	38	19	30
CAA-2,0	38	19	30
CPV-ARI 0,45	38	19	30
CPV-ARI 0,55	38	19	30

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Vale ressaltar que o volume correspondente de cada corpo de prova é de 1571 cm³, ou ainda, 1,57 litros. Portanto é possível ter conhecimento da dimensão do espaço amostral utilizado. As eventuais correções que foram pertinentes não foram compatibilizadas nos quantitativos.

Tabela 7 – Quantitativo de materiais.

Amostra	CCA (kg)	NaOH (kg)	Metaculim (kg)	CPV (kg)	Água (kg)	Areia (kg)	Brita 1 (kg)
CAA-1,2	7,4	7,4	38,8	-	23,3	48,4	87,2
CAA-1,6	9,9	7,4	38,8	-	23,2	48,4	87,2
CAA-2,0	12,4	7,4	38,8	-	23,2	48,4	87,2
CPV-ARI 0,45	-	-	-	44,0	21,2	54,8	97,7
CPV-ARI 0,55	-	-	-	41,9	24,4	52,2	93,1

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os valores da tabela 6 reúnem todo o espaço amostral que foi pertinente na análise das propriedades estruturais das matrizes dos CAA's. Os concretos ativados alcalinamente possuem os componentes ativador/precursor em quantidade maior se comparado ao cimento nos concretos de alta resistência inicial. Em contrapartida, ambos os grupos CPV-ARI 0,45 e CPV-ARI 0,55 trazem um quantitativo maior de agregados à mistura. No geral, o grupo dos concretos CAA solicita uma quantidade maior de finos (CCA e metacaulim) para a construção da matriz. Unindo o ativador (CCA, NaOH e H₂O) e o precursor (metacaulim) nos concretos geopoliméricos, tem-se um total de 76,8 kg para o CAA-1,2, 79,3 kg para o CAA-1,6 e 81,8 kg para o CAA-2,0, enquanto que para o CPV-ARI 0,45 e CPV-ARI 0,55 a referência cimento e água (pasta de cimento) dá-se num total de 65,2 kg e 66,3 kg, respectivamente. Então, há de fato uma folga de agregados nos grupos de CAA, com reforço nos materiais responsáveis pela formação dos compostos hidratados.

3.2.4 Amassamento dos concretos ativados alcalinamente

O amassamento dos concretos CAA se procede de forma similar aos concretos convencionais. Preparada a solução alcalina com 24 horas de antecedência da produção dos corpos-de-prova, a mistura se dá através do acréscimo inicial dos agregados juntamente com a água “extra”, esta proveniente da absorção característica de cada matéria (areia média natural e brita 1). Após a umidificação dos agregados, é acrescentado à mistura o aglomerante (metacaulim) e o precursor (solução ativadora com os componentes hidróxido de sódio, CCA e água). O formato ideal para o concreto fresco será quando a mistura adquirir uniformização, sem apresentar a mesma trabalhabilidade observada nos concretos convencionais. Finalizado o amassamento, procedeu-se com a moldagem dos corpos de prova.

3.2.5 Amassamento dos concretos de alta resistência inicial

A mistura típica para os concretos convencionais será a padrão para a elaboração dessa tipologia de amostra. Pesados os quantitativos dos materiais, iniciou-se o processo de mistura mecânica destes na betoneira. Inicialmente, foram adicionados os agregados que compõem a mistura (Brita 1 e Areia Média), além de 50% da parcela da água dosada. A betoneira foi ligada por 60 segundos. Posteriormente foi acrescentado o aglomerante CPV-ARI e os demais 50% da água referente.

Na sequência, o concreto formado foi misturado por mais 180 segundos, até que sua consistência ideal fosse verificada. No que diz respeito ao uso de aditivo superplastificante, para as dosagens trabalhadas não se fez necessário o acréscimo deste material à mistura, uma vez que os concretos apresentam fator a/c considerável e portanto, em sua essência, já apresentaram trabalhabilidade satisfatória.

3.2.6 Adensamento, moldagem e cura das amostras

O adensamento dos concretos foi desenvolvido de maneira padronizada para os dois grandes grupos de concretos. É mister ressaltar que tais tipologias apresentam fluidez com significativa distinção, entretanto, a construção dos corpos de prova foi viabilizada pela coesão de todas as matrizes de concreto. Com o auxílio da mesa vibratória, estipulando o tempo de vibração em aproximadamente 60 segundos, o preenchimento das fôrmas foi

gradativo e se deu através de três camadas (cerca de um terço da altura do molde, para cada parcela).

Foram utilizados moldes de PVC, cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, para os concretos de alta resistência inicial, enquanto que, para os concretos CAA, os moldes foram encomendados com material à base de PVC para a não aderência entre o mesmo e o concreto ativado alcalinamente. Com relação à cura das amostras, os corpos de prova confeccionados permaneceram em câmara úmida para cura, mediante temperatura de 25°C e umidade relativa do ar de 100%, até as idades correspondentes de ensaio.

Todos os procedimentos resumidos anteriormente foram conduzidos mediante as recomendações da NBR 5738 - ABNT, 2015.

3.2.7 Ensaios destrutivos e manuseio de dados

3.2.7.1 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Após o tempo de cura de cada concreto em questão, realizou-se o ensaio de resistência à tração compressão diametral (NBR 7222 - ABNT, 2011). As idades de ensaios foram iguais a 7, 28 e 90 dias. A ruptura foi conduzida com a utilização de uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, com capacidade de 300kN de carga aplicada.

De posse dos valores das rupturas, a resistência à tração por compressão diametral será medida analisando a área da superfície lateral do corpo de prova, já que essa região foi solicitada. Segue a expressão para o cálculo da resistência:

$$f_{ct} = \frac{\text{Força de Ruptura}}{\text{Área Lateral}} \quad (4)$$

$$\text{Área Lateral} = 2 \times \pi \times R \times H \quad (5)$$

Onde:

R – raio do corpo de prova;

H – altura do corpo de prova.

Portanto, a expressão final é descrita da seguinte forma:

$$f_{ct} = \frac{\text{Força de Ruptura}}{2 \times \pi \times R \times H} \quad (6)$$

A NBR 6118 – ABNT, 2014, traz que a resistência à tração indireta $f_{ct,sp}$ pode ser calculada na ausência dos resultados de ruptura. O valor médio ou característico é definido segundo as seguintes expressões:

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m} \quad (7)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ct,m} \quad (8)$$

Conforme as classes tem-se para concretos de classes até C50:

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (9)$$

Para classes C55 até C90:

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln (1 + 0,11 f_{ck}) \quad (10)$$

Os valores de $f_{ct,m}$ e f_{ck} são expressos em megapascal (MPa). Tais expressões podem ser utilizadas para idades diferentes de 28 dias, desde que o f_{ck} seja superior ao valor de 7 MPa. A resistência à tração direta f_{ct} , pode ser considerada igual a $0,9 f_{ct,sp}$.

3.2.7.2 Ensaio de resistência à compressão axial

Após o tempo de cura de cada grupo analisado, realizou-se o ensaio de resistência à compressão axial segundo a norma NBR 5739 - ABNT, 2018. As idades de ensaios propostas foram as necessárias para a construção do ganho de resistência inicial e também para a avaliação em maiores idades de cura. São elas: 1, 3, 7, 14, 28 e 90 dias.

Os dados de resistência à compressão foram calculados considerando o desvio relativo máximo, conforme item 3.6.3 da NBR 7215 - ABNT, 1997. Para desvios relativos máximos superiores a 6%, foram desconsiderados os valores discrepantes e calculadas novas médias, conforme prescreve o item 3.6.4 da NBR 7215 - ABNT, 1997.

Além da apresentação dos dados das médias de resistência à compressão, calculou-se o desvio padrão correspondente, após o descarte dos corpos de prova com desvios relativos acima de 6%. Com o desvio padrão calculado, o cálculo do coeficiente de variação pode ser

procedido utilizando a média de resistência obtida. O desvio padrão relaciona os valores de cada amostra com a média calculada. Segue a equação que descreve tal parâmetro:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left(\frac{f_{ci} - f_{cm}}{f_{cm}} \right)^2} \quad (11)$$

O coeficiente de variação corresponde ao percentual do desvio padrão em relação à média calculada.

$$s = 100 \times \frac{\delta}{\bar{f}} \quad (12)$$

A ruptura foi conduzida com a utilização de uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, com capacidade de 2MN.

3.2.7.3 Ensaio do módulo de elasticidade

Em concomitância com o ensaio de resistência à compressão axial, foi coletado o módulo de elasticidade dos concretos, segundo as recomendações da NBR 8522 – ABNT, 2017, por meio da utilização dos extensômetros para medir a deformação do corpo-de-prova ensaiado. A figura 31 ilustra o corpo de prova instrumentado e pronto para ser submetido à ruptura. A ruptura foi conduzida com a utilização de uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, com capacidade de 2MN.

Figura 31 – Corpo de prova instrumentado para medição do módulo de elasticidade.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conforme a NBR 6118 – ABNT, 2014, o módulo de elasticidade (E_{ci}) pode ser determinado através do valor característico de resistência do concreto e do tipo de agregado graúdo utilizado. Para um f_{ck} de 20 MPa a 50 MPa tem-se:

$$E_{ci} = \alpha E \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (13)$$

Para um f_{ck} de 55 MPa a 90 MPa:

$$E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \times \alpha E \times \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \quad (14)$$

O parâmetro αE é de 1,2 para basalto e diabásio, 1,0 para granito e gnaisse, 0,9 para calcário e 0,7 para arenito. Os valores de f_{ck} e E_{ci} são expressos em megapascal (MPa). É possível estimar o módulo de elasticidade para uma idade menor que 28 dias. Seguem as expressões para o cálculo:

$$E_{ci}(t) = \left[\frac{f_{ckj}}{f_{ck}} \right]^{0,5} \times E_{ci} \quad (15)$$

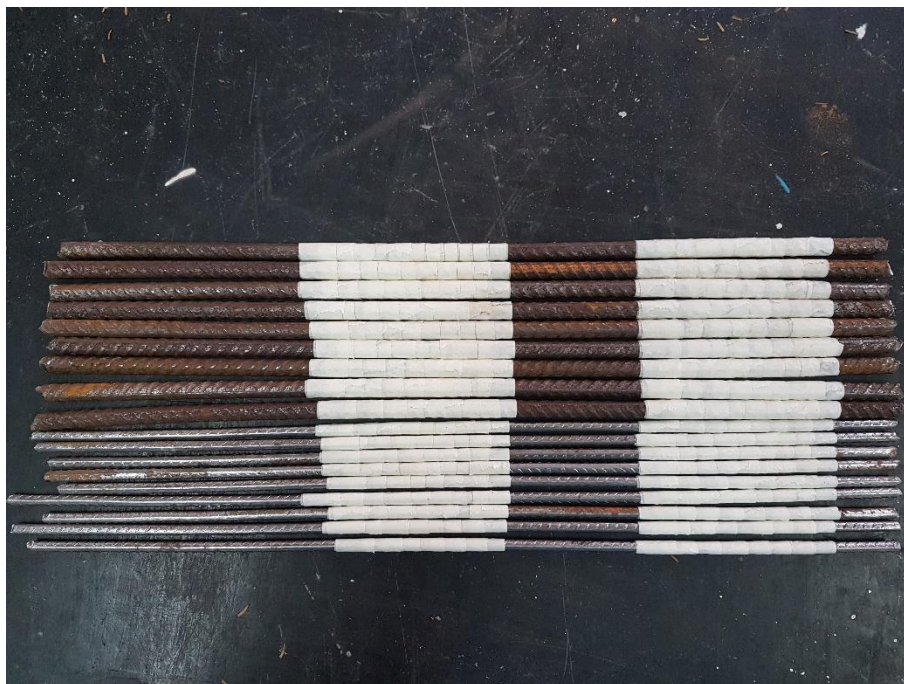
A expressão 15 é válida para concretos com f_{ck} de 20 MPa a 45MPa. Para a intervalo de 50 MPa a 90 MPa tem-se a equação:

$$E_{ci}(t) = \left[\frac{f_{ckj}}{f_{ck}} \right]^{0,3} \times E_{ci} \quad (16)$$

A grandeza $E_{ci}(t)$ corresponde à estimativa do módulo de elasticidade do concreto para uma idade entre 7 e 28 dias. O termo f_{ckj} se trata da resistência característica à compressão do concreto na idade em que se pretende estimar o módulo de elasticidade, em megapascal (MPa).

3.2.7.4 Ensaio de arrancamento

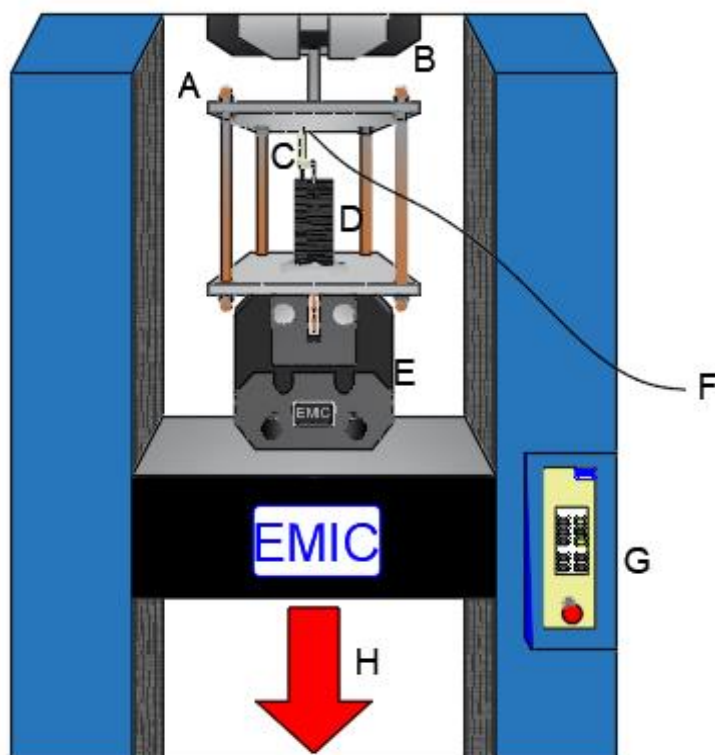
O ensaio de arrancamento foi conduzido conforme os procedimentos estabelecidos no ensaio clássico de pull-out test, segundo as normas CEB-FIB RC6 (1983). No geral, a avaliação da aderência se deu por meio da utilização dos corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm de raio e 20 cm de altura, trespassando longitudinalmente as barras de aço estruturais, cujos diâmetros de análise foram de 5mm e de 8mm, e extensão fixa de 40 cm. No que diz respeito ao comprimento de aderência, fez-se necessário um isolamento parcial da armadura em contato com o concreto, uma vez que devido à alta aderência natural para com os concretos, algumas rupturas estavam sendo observadas diretamente na barra de aço (ruptura direta da barra de aço, sem escorregamento), quando o comprimento de aderência era dado pela extensão do contato da barra com o concreto (20 centímetros). Portanto, mediante procedimento empírico, o comprimento de ancoragem de 6 centímetros foi o mais pertinente para o trabalho desenvolvido. De forma ilustrativa, tem-se, através da figura 32, o isolamento interno da barra e o comprimento reservado para a aderência ao concreto.

Figura 32 – Comprimento de aderência padronizado.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para cada idade trabalhada, referente a cada grupo de concreto, estabeleceu-se um quantitativo de três corpos de prova para a montagem das curvas de arrancamento médias. Cada corpo de prova foi posicionado e instrumentado conforme as figuras 33 e 34, conduzindo-se na sequência o ensaio de arrancamento.

Figura 33 – Representação do corpo de prova para arrancamento na prensa EMIC.

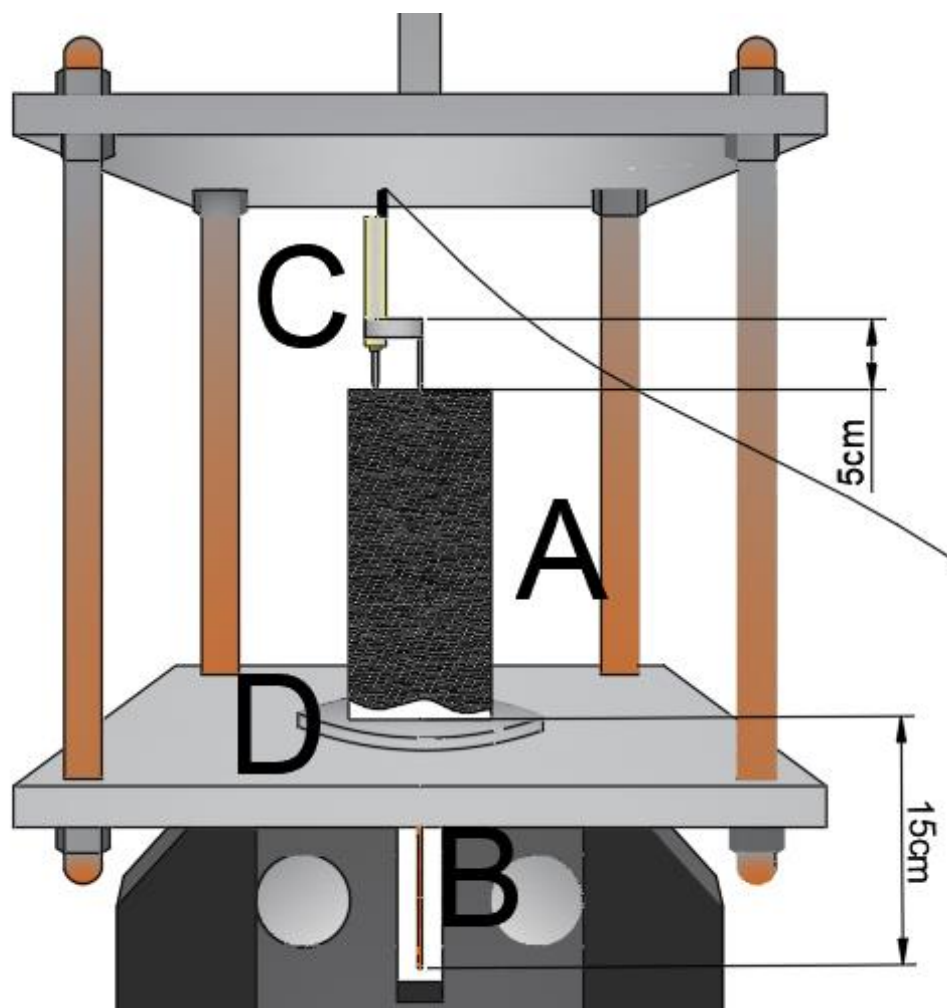


A – Suporte para ligação entre o corpo de prova e as garras da prensa; B – Garra superior; C – Medidor de deformação (LVDT ES 1050022); D – Corpo de prova de concreto CPV ARI ou CAA; E – Garra inferior; F- Fio de ligação do medidor ao sistema de aquisição de dados; G – Painel de controle do ensaio; H - Sentido de aplicação da força.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A figura 34 fornece um vista mais aproximada do corpo de prova posicionando na prensa de ensaio e instrumentado com o medidor de deformações.

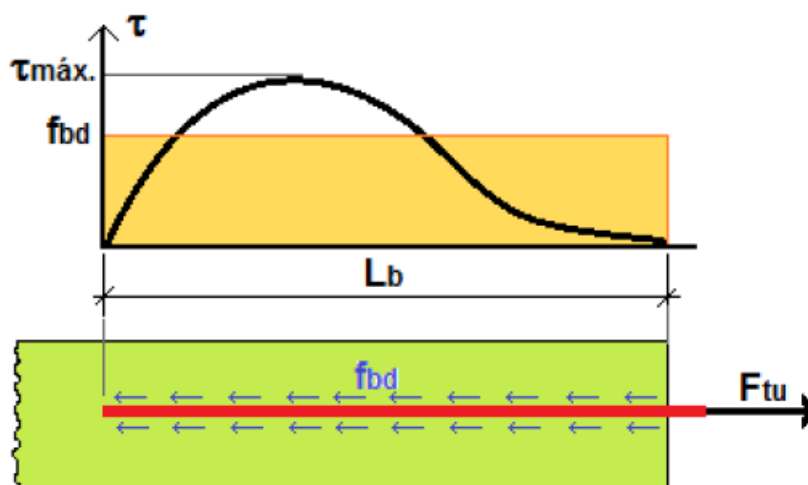
Figura 34 – Representação do corpo de prova para arrancamento e o medidor de deformações.



A – Corpo de prova de altura 20 centímetros; B – Folga de 15 centímetros deixada para a barra de aço, com o propósito de fornecer um comprimento suficiente para o encaixe com a garra; C – Medidor de deformação (LVDT ES 1050022), o comprimento reservado na parte superior para a barra de aço foi de 5 centímetros; D – Regularização de gesso.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O ensaio de arrancamento conduz ao resultado referente à força necessária para romper a ligação da barra de aço com o concreto. Portanto, as curvas indicam um ponto crítico de força, este, representando justamente a força requerida para o arranque do vergalhão de aço estrutural. Esse parâmetro em questão será quantificado através de um valor médio, e considerando a área de contato entre a matriz e a barra, é possível calcular a tensão de aderência para o grupo trabalhado, em relação a um diâmetro específico, conforme a figura 35.

Figura 35 – Tensão de aderência entre o vergalhão de aço e o concreto.

Fonte: Camacho (2014).

A tensão f_{bd} se trata de uma aproximação do valor da tensão de aderência em situações onde não se tem o diagrama completo da distribuição de tensão na superfície da barra, conforme exposto pela NBR-6118:2014. Entretanto, o ensaio de arrancamento permite a construção das curvas e a obtenção da tensão de aderência máxima.

A expressão para converter a força de arrancamento para a tensão de aderência média é dada a seguir:

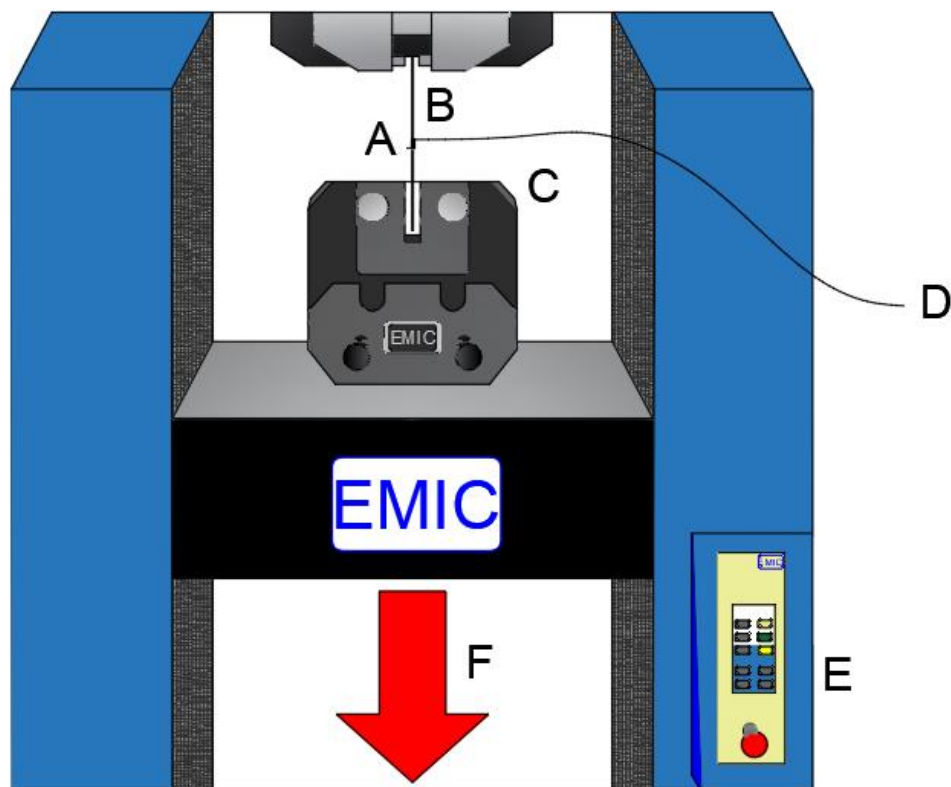
$$\sigma_a = \frac{\text{Força de Arrancamento}}{\pi \times d \times l} \quad (17)$$

Onde:

- d – diâmetro do vergalhão de aço;
- l – comprimento de aderência.

3.2.7.5 Ensaio de tração das barras de aço

Para a caracterização das barras de aço estruturais, foi necessária a montagem de um medidor de deformações no centro do segmento de barra. Esse medidor foi o extensômetro cujo modelo é o excel strain gauge. A figura 36 traz a barra instrumentada e posicionada para o ensaio de tração na prensa EMIC.

Figura 36 – Posicionamento da barra de aço para ensaio de tração na prensa EMIC.

A – Extensômetro excel strain gauge; B – Seguimento da barra de aço de 40 cm; C – Garra inferior; D- Fio de ligação do medidor ao sistema de aquisição de dados; E – Painel de controle do ensaio; F - Sentido de aplicação da força.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.2.7.6 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utilizado para o levantamento de deformações é o **AddAnalysis 7**. O sistema se baseia no recebimento de sinais elétricos, com o retorno, de acordo com o medidor em questão, de deformações características. Os medidores são conectados conforme a representação dos canais. Cada canal representa um formato de ponte (fiação específica do medidor), e conforme a especificação do instrumento de medição, este deve ser conectado de maneira correta em um dos canais próprios. A figura 37 representa o conjunto de canais próprios do sistema de aquisição.

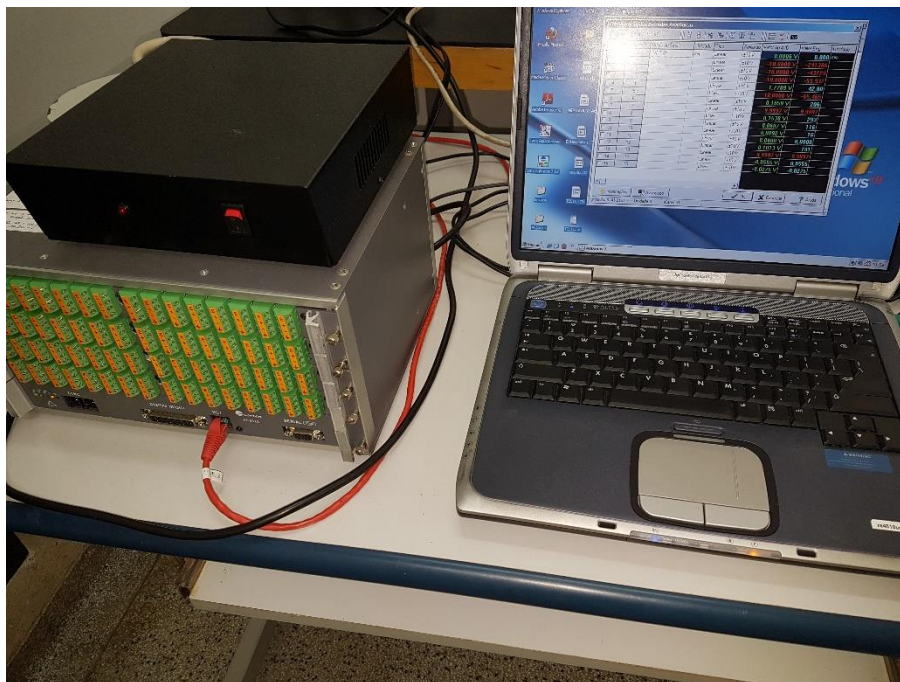
Figura 37 – Canais do sistema de aquisição de dados.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O procedimento de utilização do sistema se resume nas seguintes etapas: a primeira é a devida conexão do instrumento de medida nos canais; a segunda etapa é atribuir a constante própria do medidor, calculada segundo as conversões entre voltagem e deformação, na janela de entradas analógicas do *AddAnalysis 7*; em seguida, é necessário zerar o medidor, considerando-se que o mesmo já esteja na posição própria para o ensaio; por fim, dá-se início ao ensaio com o gatilho de executar. Depois do apanhado das deformações, o segundo arquivo executável do *AddAnalysis 7* permite a visualização da curva tempo x deformação, além da montagem do arquivo de dados para posterior manuseio das curvas.

Para a coleta dos valores de deslizamento da barra de aço no teste de arrancamento (pul-out test), foi utilizado o instrumento de medida LVDT 6000; para a coleta das deformações das barras de aço, utilizou-se o extensômetro da marca Excel. A figura 38 ilustra o sistema na iminência da realização de um ensaio. A janela principal exibe as voltagem lidas em cada canal. De acordo com o selecionado, tem-se a descrição das leituras na janela do sistema de aquisição.

Figura 38 – Canais do sistema de aquisição de dados e janela principal.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.2.7.7 Tratamento estatístico de dados

O tratamento estatístico é fundamental para que se proceda com a devida classificação e comparação dos concretos estudados. Mediante o cálculo da média aritmética e do respectivo desvio padrão de uma determinada leva de amostras, é possível avaliar de maneira inicial onde determinado grupo de posiciona em termos de valores absolutos. Entretanto, uma avaliação mais aprofundada dos dados leva à uma maior garantia de comparar os grupos ou ainda afirmar que um grupo está acima ou abaixo de um outro determinado. Em outras palavras, os testes estatísticos nos informa se há diferenças significativas dentro de um número “x” de grupos, e ainda como complemento, é possível, mediante os testes, correlacionar esses mesmos grupos. Os testes ANOVA e TUKEY desempenham justamente essa função, de forma que o último complementa o primeiro, caso haja a constatação de diferenças significativas pelo ANOVA.

De maneira geral, o teste ANOVA pode ser avaliado com um único fator, ou seja, quando a análise é em relação a uma única variante, podendo ser por exemplo algumas das propriedades mecânicas que serão avaliadas nos cinco grupos de concreto. O software Microsoft Excel realiza a análise pelo ANOVA de maneira automática, bastando apenas

selecionar os dados que serão avaliados. A figura 39 ilustra um modelo arbitrário do ANOVA pelo Microsoft Excel.

Figura 39 – Teste ANOVA (único fator) – Microsoft Excel.

Fonte de variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,497933	2	2,248967	25,473	0,000613	4,737414
Dentro dos grupos	0,618018	7	0,088288		HÁ DIFERENÇA SIGNIFICATIVA!!	
Total	5,115951	9				

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os cálculos fornecem uma série de resultados. Para saber se existem diferenças significativas entre os grupos analisados, o coeficiente F informará se realmente as variações entre os grupos foram constatadas. Caso o parâmetro F calculado seja maior que o parâmetro crítico (F_{crit}), os grupos analisados não iguais entre si. Contudo, na avaliação de mais de dois grupos, é possível que as diferenças significativas não sejam constatadas no pareamentos de algumas amostras, e portanto uma análise complementar faz-se necessária.

O complemento do ANOVA é o divisor de águas para a classificação dos grupos estudados. Novamente, existem alguns softwares que realizam a análise de maneira automática, por meio da inserção dos valores das amostras. O software Past versão 3.14 foi utilizado para o agrupamento das amostras. O programa também fornece os resultados do teste ANOVA, além da opção de alguns outros testes estatísticos. A figura 40 ilustra um modelo arbitrário do teste TUKEY pelo software Past.

Figura 40 – Teste TUKEY (único fator) – Software Past.

Amostra	CAA-1,6	CAA-2,0	CPV 0,55
CAA-1,6		0,0039	0,0007
CAA-2,0	7,059		0,3071
CPV 0,55	9,478	2,262	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A interpretação dos dados gira em torno do parâmetro p, o qual se limita a 5%, sendo a confiabilidade padronizada para a análise estatística. A figura 40 traz a identificação dos grupos arbitrários analisados tanto na vertical quanto na horizontal, o que significa que cada grupo será comparado com os demais. A diagonal principal em branco é justamente a referência da comparação de um grupo com ele mesmo, o que no caso não há sentido em

proceder. Acima da diagonal principal são os valores do parâmetro p , de maneira que se a aceitação de 5% ou acima não for garantida, os grupos em questão apresentam diferenças significativas. Atendidos o valor de 5% ou superior, os grupos não apresentam diferenças significativas em suas médias.

A avaliação do teste na região da tabela abaixo da diagonal principal também pode ser feita, de maneira que os valores em cada cédula não podem exceder o parâmetro de TUKEY, o qual limita o intervalo entre as médias.

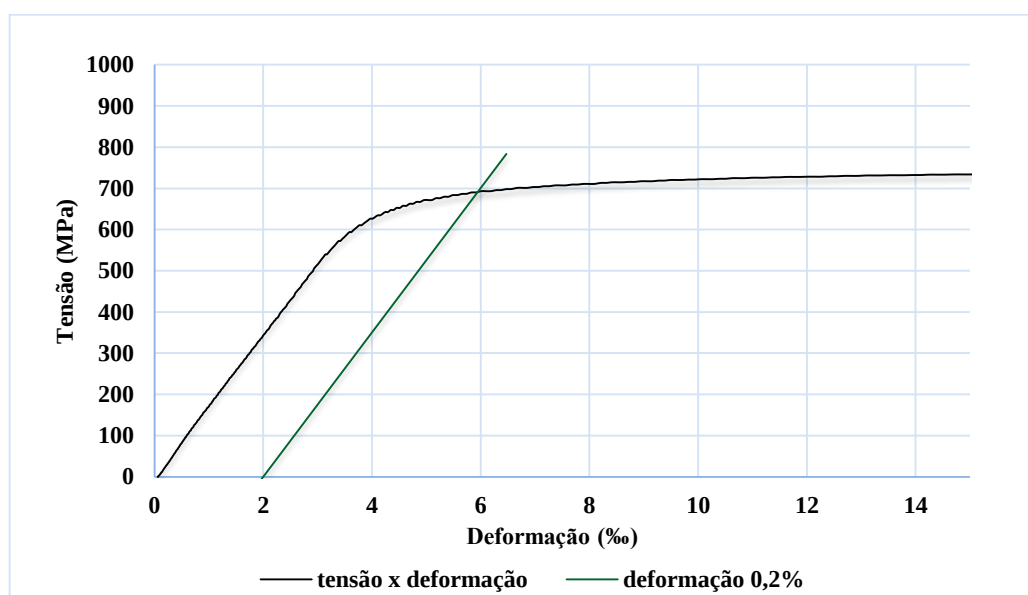
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados preliminares compõem a caracterização das barras de aço utilizadas nos teste de aderência da interface concreto/aço e os dados obtidos dos ensaios destrutivos próprios para o levantamento das propriedades mecânicas dos concretos.

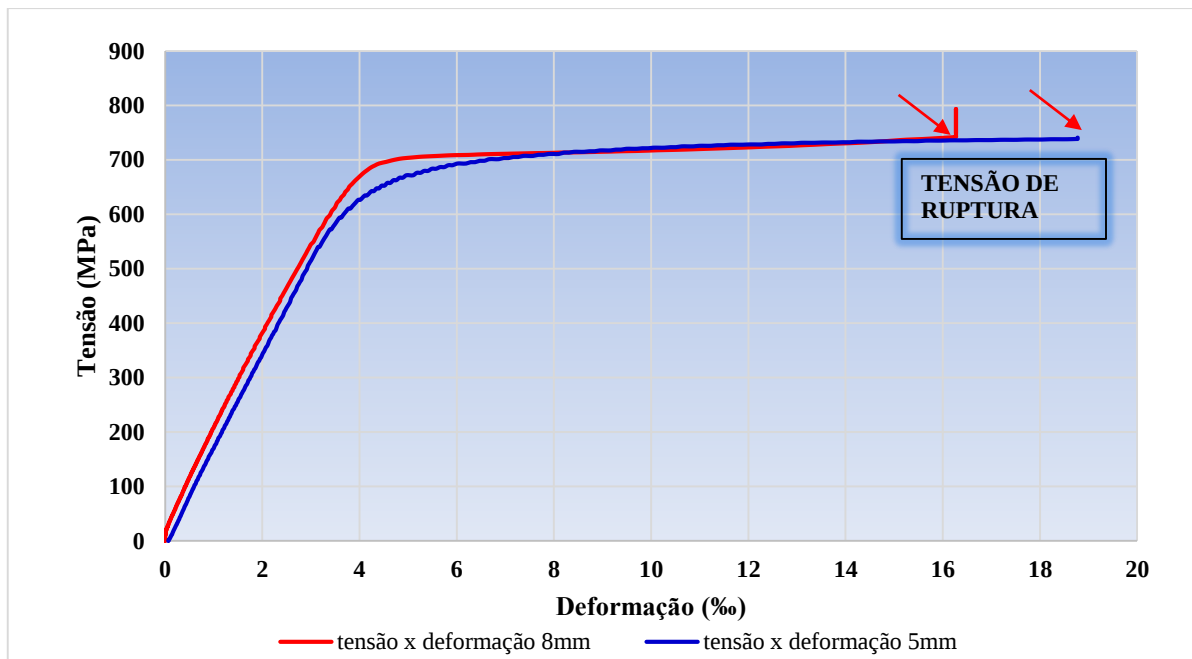
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAS DE AÇO

A figuras 41 e 42 ilustram as curvas de tensão por deformação obtidas conforme o ensaio de tração especificado por norma, para as barras de 5 e 8 milímetros, respectivamente.

Figura 41 – Curva tensão x deformação (barra de 5 milímetros).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 42 – Comparativo das curvas tensão x deformação (barra de 8 e 5 milímetros).

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para a obtenção das propriedades do aço, é necessário trabalhar com a inclinação do trecho elástico das curvas para a retirada do módulo de elasticidade, e a curva paralela ao tramo elástico com origem na deformação 2‰ fornecerá a tensão de escoamento quando atingir um mesmo valor de força em relação à curva propriamente dita. O valor da tensão de escoamento para a barra de 5 milímetros, cuja classe corresponde ao CA-60, foi de **691,50 MPa**, e a tensão de ruptura foi no valor de **740,62 MPa**. Com a interpretação do tramo elástico da curva, tem-se que o módulo de elasticidade para a barra, correspondente à inclinação do patamar linear da curva, sendo em termos de valor **175,30 GPa**. Esse procedimento é aplicado para o aço de classe CA-60.

Para as classes CA-25 e CA-50, a tensão de escoamento do aço é representada pelo patamar de escoamento verificado na curva tensão x deformação. O módulo de elasticidade é determinado de maneira análoga às barras de 8 milímetros, cujo valor foi de **201,48 GPa**. A tensão de escoamento é determinada diretamente com o patamar de escoamento. Esse patamar é definido conforme a curva tensão x deformação apresentada. É mister ressaltar que o instrumento de medição utilizado interrompeu a coleta de deformações quando o seu limite foi atingido, o que poderia levar a continuidade do patamar de escoamento. O valor da tensão de escoamento foi no entorno de **720 MPa**. A tensão de ruptura da barra de aço ficou definida no valor de **793,33 MPa**, conforme a listagem apresentada pela prensa EMIC.

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CONCRETOS

4.2.1 Resistência à compressão axial

A tabela 8 abrange as resistências à compressão axial acompanhadas dos desvios padrão da amostragem considerada, até os 90 dias de idade.

Tabela 8 – Resistência à Compressão Axial (MPa).

Amostra	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	90 dias
CAA-1,2	6,22 ± 0,19	16,36 ± 0,70	16,53 ± 1,14	16,43 ± 1,13	17,10 ± 0,09	18,97 ± 0,61
CAA-1,6	16,58 ± 0,24	21,00 ± 0,04	26,79 ± 0,86	28,53 ± 0,55	28,75 ± 0,84	28,45 ± 1,35
CAA-2,0	15,54 ± 0,49	22,90 ± 0,68	29,91 ± 1,65	29,72 ± 0,06	33,00 ± 0,88	33,50 ± 0,82
CPV 0,55	14,26 ± 0,23	20,38 ± 1,27	24,36 ± 2,21	32,22 ± 2,70	33,25 ± 2,57	37,11 ± 2,54
CPV 0,45	28,48 ± 2,31	31,66 ± 0,46	35,94 ± 0,45	37,29 ± 2,19	40,48 ± 2,46	52,11 ± 5,93

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Uma análise inicial dos dados da tabela 8 classifica os concretos ativados alcalinamente como componentes de ganho inicial significativo. A amostra CAA-1,2 apresenta seu patamar de resistência já alcançado aos três dias de idade de cura, sem nenhuma elevação considerável a medida que a idade analisada tem datação maior. Essa ausência de ganho na propriedade analisada pela tabela 8 se mantém até os 28 dias. As tipologias CAA-1,6 e CAA-2,0 trazem resistências consideráveis aos sete dias de cura, em que o grupo CAA-2,0 fornece um acréscimo da propriedade na transição das idades de 14 e 28 dias, enquanto que o concreto CAA-1,6 fornece um ganho inexpressivo para o mesmo intervalo de análise.

Através das curvas de resistência pela fator água cimento (HELENE ; TERZIAN, 1993), é possível estabelecer um comparativo das resistências encontradas para os concretos CPV-ARI com os valores do ábaco da figura 11. Tem-se para as idades de 3, 7, 28 e 90 dias, os seguintes valores **médios**:

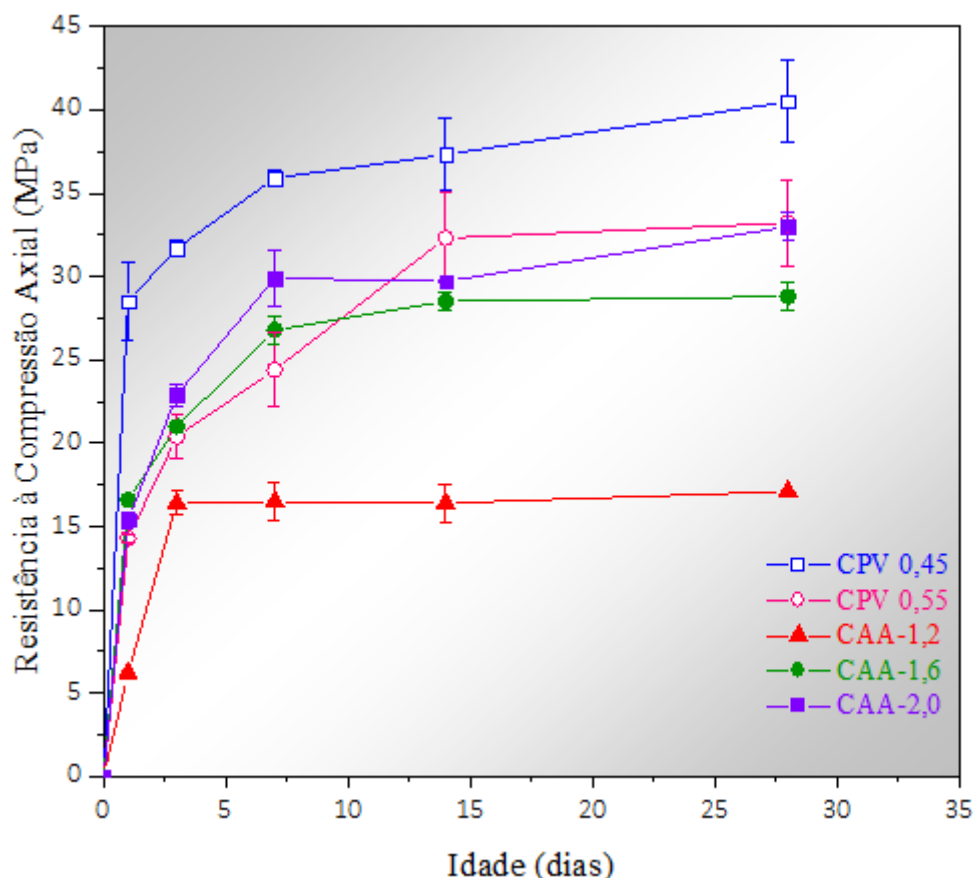
Tabela 9 – Comparativo resistências concretos convencionais CPV-ARI.

<i>f_{cm} aos 3 dias</i>			
<i>Amostra</i>	<i>f_{ck} - Helene e Terzian</i> <i>(MPa) – CP - 32</i>	<i>f_{ck} - Helene e Terzian</i> <i>(MPa) – CPV- ARI</i>	<i>f_{cm3}- ensaio</i> <i>(MPa)</i>
CPV-ARI 0,45	19	23,75	31,66
CPV-ARI 0,55	14	17,50	20,38
<i>f_{cm} aos 7 dias</i>			
<i>Amostra</i>	<i>f_{ck} - Helene e Terzian</i> <i>(MPa) – CP - 32</i>	<i>f_{ck} - Helene e Terzian</i> <i>(MPa) – CPV- ARI</i>	<i>f_{cm7} - ensaio</i> <i>(MPa)</i>
CPV-ARI 0,45	26	32,50	35,94
CPV-ARI 0,55	19	23,75	24,36
<i>f_{cm} aos 28 dias</i>			
<i>Amostra</i>	<i>f_{ck} - Helene e Terzian</i> <i>(MPa) – CP - 32</i>	<i>f_{ck} - Helene e Terzian</i> <i>(MPa) – CPV- ARI</i>	<i>f_{cm28} - ensaio</i> <i>(MPa)</i>
CPV-ARI 0,45	37	44,40	40,48
CPV-ARI 0,55	30	36,00	33,25
<i>f_{cm} aos 90 dias</i>			
<i>Amostra</i>	<i>f_{ck} - Helene e Terzian</i> <i>(MPa) – CP - 32</i>	<i>f_{ck} - Helene e Terzian</i> <i>(MPa) – CPV- ARI</i>	<i>f_{cm90} - ensaio</i> <i>(MPa)</i>
CPV-ARI 0,45	42	50,40	52,11
CPV-ARI 0,55	36	43,20	37,11

Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com a tabela 9, os concretos convencionais possuem valores de resistência à compressão axial próximos dos estimados pelo método de dosagem do IPT. As maiores discrepâncias foram observadas nas idades de 3 dias, para ambos os tipos de concreto, e nas idades de 7 e 28 dias do concreto CPV-ARI 0,55. Entretanto, os valores encontrados conforme os ensaios permitem a avaliação do ganho de resistência e a elaboração de um comparativo para com os concretos alternativos.

A avaliação da resistência das amostras permitiu compor uma curva representativa do comportamento gradativo dos concretos por meio da avaliação de múltiplas idades de cura. A figura 43 ilustra a evolução dessa propriedade meio das médias de resistências encontradas para cada grupo de concreto.

Figura 43 – Evolução da resistência à compressão axial dos concretos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

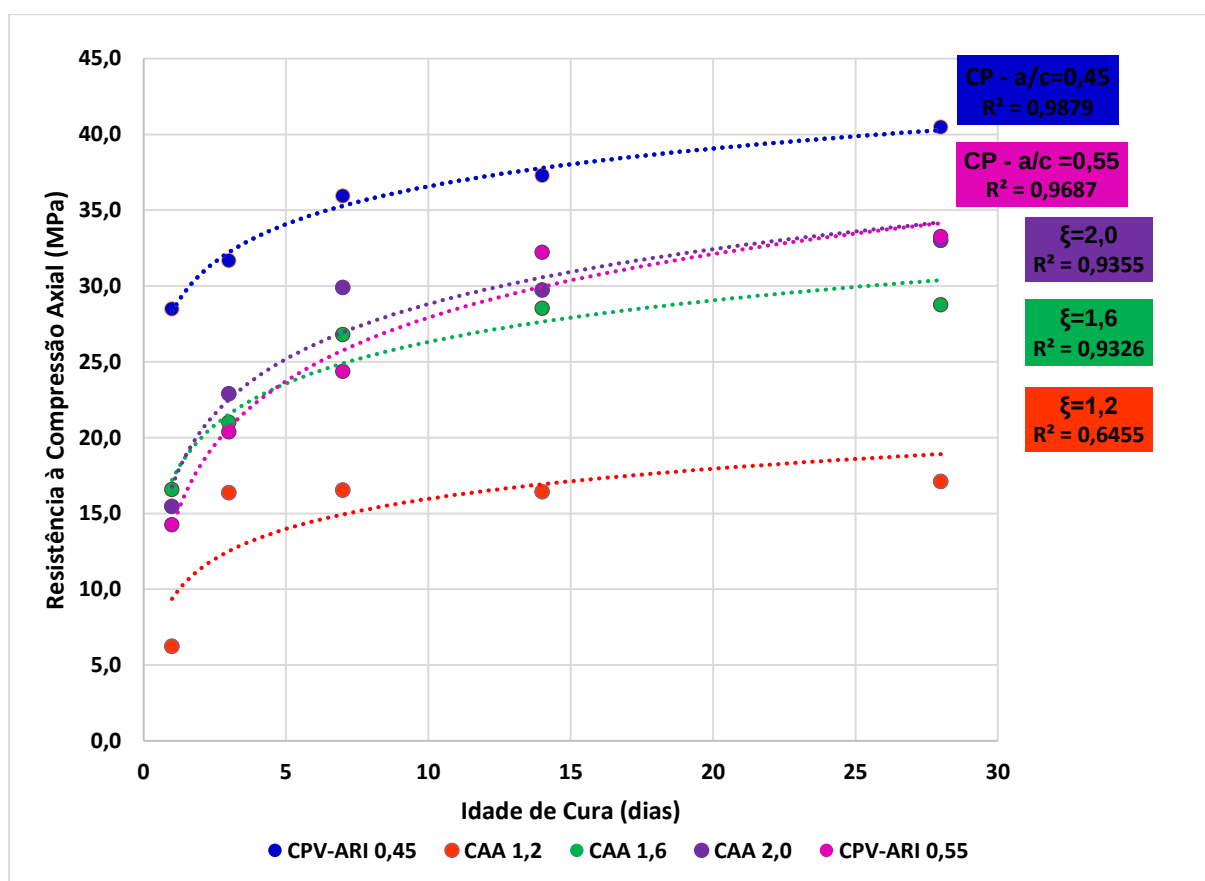
O intervalo estabelecido entre as curvas dos concretos com cimento Portland CPV-ARI é o ilustrado pelas curvas de coloração azul e rosa da figura 43; a curva amarela representa o CPV-ARI 0,55 e a azul faz referência ao CPV-ARI 0,45. O intuito é que as curvas dos concretos ativados alcalinamente possam se dispor nesse intervalo, ou até mesmo se localizarem acima da curva azul (limite superior), o que seria um cenário muito interessante vide as resistências que estariam sendo evidenciadas.

Há notadamente um ganho inicial expressivo em ambas as curvas, especialmente aos sete dias de idade. Conforme o avanço nas idades, ainda há uma crescente de resistência até que se atinja a idade de 28 dias. As curvas apresentadas se aproximam dos resultados encontrados por Zhang *et al.* (2018), em especial a curva correspondente ao CAA-1,2. Em relação às demais tipologias de CAA, existe uma maior taxa de crescimento entre as idades de 1 e 7 dias. De acordo com Zhang *et al.* (2018), a cura do concreto geopolimérico foi realizada até a idade de 7 dias, fato este que é citado pelos autores como possível justificativa para o ganho atingido aos 7 dias de 96% da resistência de pico. Os concretos CAA foram

submetidos às mesmas condições de cura dos concreto de cimento Portland, de maneira que a cura úmida era feito até a idade de ensaio. Acredita-se a curva do concreto CAA-1,2 tenha esse comportamento distinto das demais por conta dos parâmetros de dosagem, nos quais o quantitativo de CCA na mistura, sendo inferior conforme a relação molar 1,2, afeta na formação gradual dos compostos hidratados N-A-S-H.

Na busca pela melhor representação da resistência à compressão axial conforme a idade de ensaio, a figura 44 traz as melhores curvas de acordo com idades trabalhadas.

Figura 44 – Curvas que melhor representam a evolução da resistência à compressão axial dos concretos.



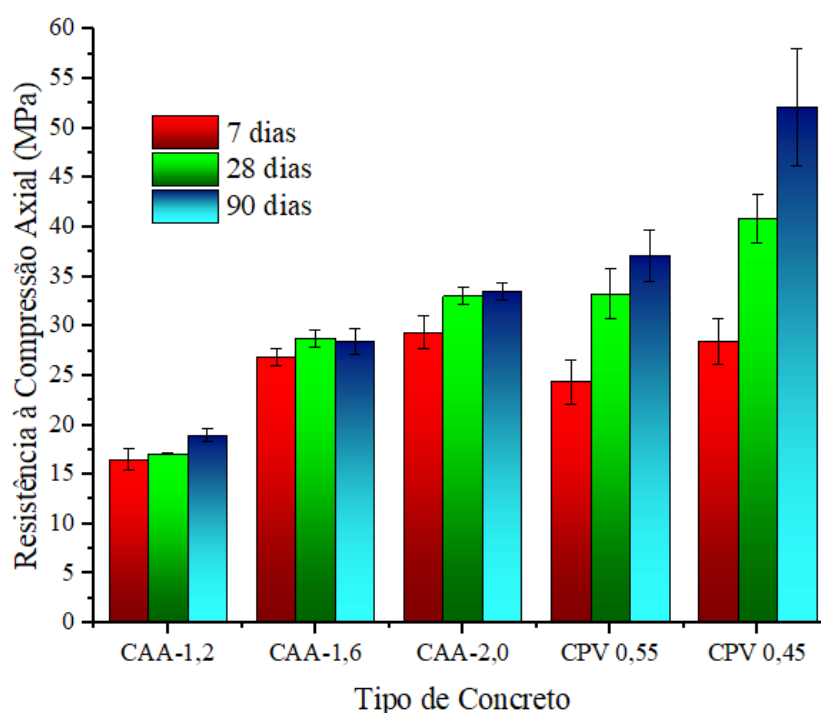
Fonte: Elaborado pelo autor.

Em termos comportamentais da curva de resistência, o formato logarítmico garante um valor do R^2 acima de 95% para ambos os modelos de curvas, no que faz referência aos concretos CPV-ARI. Portanto existe uma alta possibilidade de valores medidos em idades aleatórias, ou até mesmo novas medições das idades correspondentes para a construção das curvas, estarem expressos pela formato de curva apresentada.

Procedendo com a análise direcionada aos concretos ativados alcalinamente, com exceção da tipologia CAA-1,2, as demais amostras (CAA-1,6 e CAA-2,0) apresentam um comportamento próximo ao formato logarítmico, o que diretamente aproxima os concretos CAA dos de alta resistência inicial CPV-ARI. De fato, uma vez que era desconhecido o comportamento geral dessas amostras alternativas, existe uma proximidade clara para com os concretos convencionais. Assim como nas próprias médias de resistências, as curvas de evolução dessa propriedade aproximam, em especial as amostras com melhores propriedades, os concretos CAA com o referência para análise CPV-ARI 0,55.

Analizando os dados de resistência para a idade de 90 dias e montando um comparativo para com as idades de 7 e 28 dias, tem-se a seguinte análise gráfica:

Figura 45 – Evolução da resistência à compressão axial dos concretos – 7, 28 e 90 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É mister ressaltar que as oscilações nas médias e nos coeficientes fornecem uma estimativa inicial da propriedade estudada. Para uma verificação mais específica da variância entre os grupos, os teste do ANOVA (uma fase) e TUKEY permitem o levantamento das diferenças significativas das médias encontradas para esses grupos de concreto. Uma vez que, através da figura 5.5, nota-se uma aproximação maior entre os grupos CAA-1,6, CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55, a variância será analisada, conforme cada idade em questão, para os grupos

com f_{cm} similares. A tabela 10 traz a análise feita da variação significativa entre as médias de resistência entre os grupos.

Tabela 10 – Testes ANOVA e TUKEY, resistência à compressão axial, para as amostras CAA-1,6, CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55.

ANOVA (único fator) - 7 DIAS						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	66,94535	2	33,47268	8,159125	0,00952	4,256495
Dentro dos grupos	36,92235	9	4,102483		HÁ DIFERENÇA SIGNIFICATIVA!	
Total	103,8677	11				
TUKEY (único fator) - 7 DIAS						
Amostra	CAA-1,6		CAA-2,0		CPV 0,55	
CAA-1,6			0,2922		0,0909	
CAA-2,0	2,271				0,0077	
CPV 0,55	3,404		5,675			
ANOVA (único fator) - 28 DIAS						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	39,13838	2	19,56919	8,077924	0,01203	4,45897
Dentro dos grupos	19,38042	8	2,422552		HÁ DIFERENÇA SIGNIFICATIVA!!	
Total	58,5188	10				
TUKEY (único fator) - 28 DIAS						
Amostra	CAA-1,6		CAA-2,0		CPV 0,55	
CAA-1,6			0,0119		0,0554	
CAA-2,0	5,455				0,7232	
CPV 0,55	3,943		1,107			
ANOVA (único fator) - 90 DIAS						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	79,69646	2	39,84823	5,126827	0,036894	4,45897
Dentro dos grupos	62,17994	8	7,772493		HÁ DIFERENÇA SIGNIFICATIVA!!	
Total	141,8764	10				
TUKEY (único fator) - 90 DIAS						
Amostra	CAA-1,6		CAA-2,0		CPV 0,55	
CAA-1,6			0,1430		0,0313	
CAA-2,0	3,025				0,5280	
CPV 0,55	4,494		1,587			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A tabela 10 demonstra, conforme as três idades avaliadas (7, 28 e 90 dias), que há diferença significativa entre os grupos CAA-1,6, CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55, conforme o teste ANOVA com um único fator ($F > F_{\text{crítico}}$). Como complemento, o teste de Tukey revela se há igualdade entre os grupos; os valores ressaltados e em coloração vermelha demonstram que os grupos em questão não podem ser classificados como iguais ($p < 0,05$). A diagonal principal divide o teste de Tukey em dois coeficientes: os abaixo da diagonal principal representam o distanciamento entre os grupos; os valores acima da diagonal principal representam um comparativo desses valores com o fator de Tukey, o qual limita o intervalo de igualdade entre os grupos em 5%.

Os testes informam que as resistências aos 28 e 90 dias dos concretos CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55 podem ser atribuídas à um mesmo grupo. Em relação à amostra CAA-1,6, esta, pertence aos mesmo grupo do concreto referência na idade de 7 e 28 dias. Os concretos alternativos também se interseccionam, nas idades de 7 e 90 dias, o que demonstra uma clara proximidade entre as relações molares $\xi=1,6$ e $\xi=2,0$.

Em termos de classificação final, o concreto CPV-ARI 0,45 pode ser atribuído ao f_{cm} de 40MPa, considerando a abordagem aos 28 dias. A outra referência da tipologia dos “alta resistência inicial” terá atribuição para $f_{\text{cm}28}$ de 30MPa, em conjunto com o CAA 2,0, o qual demonstrou o ápice dentre os concretos alternativos, no que diz respeito à resistência à compressão axial. A amostra CAA 1,6 é muito próxima da classe de $f_{\text{cm}28}$ 30MPa, porém usando o critério das médias de resistências, um $f_{\text{cm}28}$ de 25MPa seria, em conjunto com o $f_{\text{cm}28}$ 30, plausível de ser designada para esse tipo de concreto ativado alcalinamente. Em contrapartida, o grupo CAA 1,2 fornece uma propriedade visivelmente inferior aos demais, sendo que sua classe estaria inserida entre as padronizadas de $f_{\text{cm}28}$ 15 e 20MPa.

Observou-se uma maior variância da resistência nos grupos de concretos convencionais. Porém, os coeficientes de variação posicionam a propriedade analisada em intervalos satisfatórios, visto que para os concretos CAA há, em especial nas amostras CAA-1,2 e CAA-1,6, a manutenção da resistência conforme o avanço na idade de cura.

É mister acrescentar que o crescimento na propriedade observado entre os concretos ativados alcalinamente, de maneira que o acréscimo de CCA na mistura fornece uma maior resistência à compressão. Conforme Ávila (2018), as argamassas de metacaulim ativadas alcalinamente com CCA+NaOH forneceram a maior resistência para a relação molar $\xi = 1,6$. A relação $\xi = 2,0$ não foi trabalhada pela autora, entretanto, a mesma observou uma crescente na propriedade de resistência conforme o aumento da relação molar. De fato, quando existe uma maior taxa de silício inicial, este advindo da cinza da casca de arroz, a formação dos géis

iniciais (relação Si/Al igual 1) é mais significativa, uma vez que no ativador a ligação Si-O-Si já foi quebrada por conta da pré-ativação, esperando-se, portanto, uma maior formação dos compostos hidratados (N-A-S-H).

Elaborando um paralelo entre as amostras CAA-1,2 e CAA-2,0, em relação à dosagem, não há grandes distinções. Contudo, é de extrema importância o ponto de partida nessas amostras alternativas elaboradas. A dispensa do silicato de sódio torna intrínseco o fornecimento adequado de silício através do resíduo base do trabalho. A cinza da casca de arroz, a qual é a fornecedora de sódio, deve ser atuante na mistura de concreto, e de maneira empírica observa-se que a classe terá desempenho mais satisfatório a partir do CAA-1,6.

4.2.2 Módulo de elasticidade

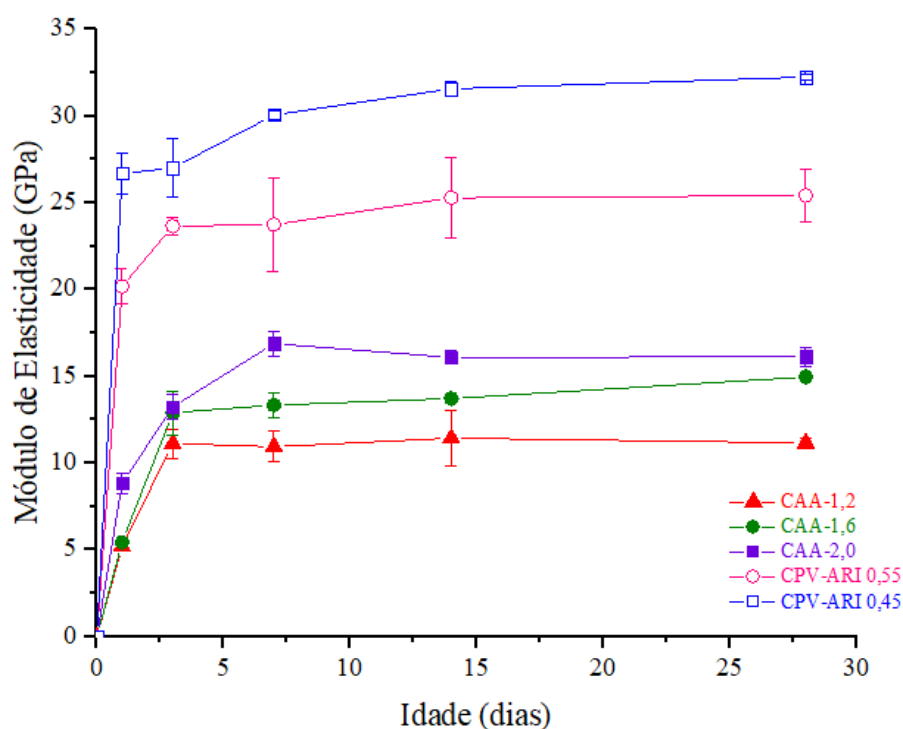
A tabela 11 engloba os dados médios e desvios padrão dos módulos de elasticidade longitudinais para todos os grupos trabalhados, com avaliação das idades de 1 a 90 dias de cura.

Tabela 11 – Módulo de Elasticidade (GPa).

Amostra	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	90 dias
CAA-1,2	5,21 ± 0,21	11,13 ± 0,84	10,94 ± 0,88	11,44 ± 1,59	11,16 ± 0,25	10,96 ± 0,23
CAA-1,6	5,44 ± 0,23	12,90 ± 1,26	13,34 ± 0,21	13,72 ± 0,21	14,96 ± 0,08	17,27 ± 0,25
CAA-2,0	8,83 ± 0,61	13,24 ± 0,74	16,89 ± 0,72	16,08 ± 0,38	16,13 ± 0,56	17,26 ± 1,24
CPV 0,55	20,17 ± 1,03	23,65 ± 0,52	23,74 ± 2,70	25,28 ± 2,32	25,41 ± 1,54	29,97 ± 1,34
CPV 0,45	26,69 ± 1,20	27,00 ± 1,67	30,06 ± 0,26	31,56 ± 0,38	32,24 ± 0,19	31,35 ± 0,06

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Existe um claro distanciamento da propriedade, comparando os concretos de alta resistência inicial e os concretos ativados alcalinamente. Aos sete dias de idade, são notórios os módulos alcançados pelos grupos CPV-ARI 0,55 e CPV-ARI 0,45, com superação da casa de 20 GPa para ambos. E há ainda, até de forma expressiva, um crescimento do parâmetro mecânico, mesmo que mais evidente nas amostras CPV-ARI 0,45. A figura 46 ilustra o comportamento da propriedade conforme o avanço na idade de ensaio das amostras.

Figura 46 – Evolução do módulo de elasticidade dos concretos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os concretos alternativos atingem limitações no que diz respeito ao módulo de elasticidade. Em especial para o grupo CAA-2,0, houve êxito pelo aumento dessa propriedade, apesar das médias apresentarem quedas na transição entre as idades de 7, 14 e 28 dias. Em termos estatísticos, e considerando a sensibilidade do medidor de deformação utilizado para a construção do módulo, há uma possível constância na propriedade em questão, apesar do que está retratado para o CAA-2,0 aos 14 dias de idade, cujos valores limitadores são 16,17 GPa e 17,61 GPa. Observa-se, aos 90 dias de idade, em ambas as tipologias CAA-1,6 e CAA-2,0, uma elevação na média, na transição entre as idades de 28 e 90 dias. Não convém afirmar que os concretos alternativos possuem um crescimento no módulo de elasticidade conforme o avanço nas idades. É mais coerente tratar essa propriedade, assim como na resistência à compressão axial, como ganho majoritário de sua capacidade aos 7 dias e manutenção nas idades subsequentes. As justificativas para tal comportamento, assim como na resistência à compressão axial, são abordadas por Singh *et al.* (2015).

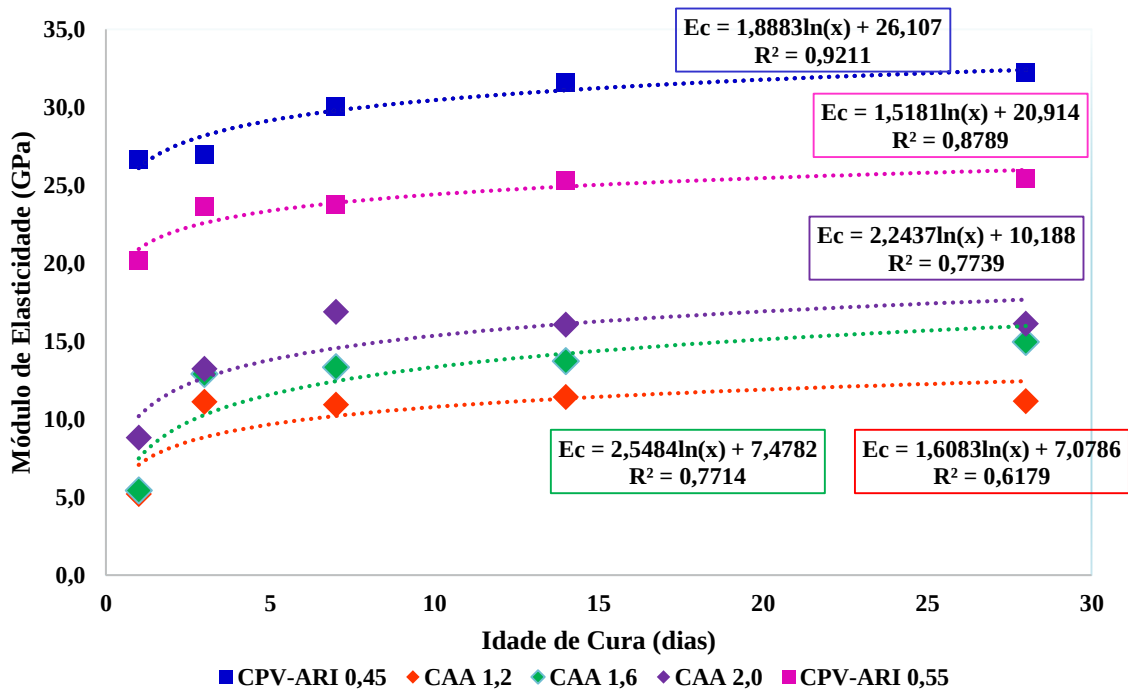
Com a visão também pautada na carga última dos concretos, essa mesma amostra CAA-2,0 terá sua descrição de curva tensão versus deformação apresentando deformações

sem variação nos carregamentos aplicados. Portanto, se para as tipologias de concretos alternativos há uma transparente inferioridade na propriedade mecânica levantada, peças formadas por esses compósitos apresentarão deformações menores àquelas observadas para os concretos de cimento Portland. Ainda assim, as matrizes fornecem módulos de elasticidade plausíveis, principalmente tratando dos grupos CAA-1,6 e CAA-2,0.

De fato, tal propriedade terá peso grande, em especial no processo de dimensionamento das peças estruturais. Entretanto, se houve minimamente a reprodução da resistência do concreto CPV-ARI 0,55, é notável o ganho que se pode adquirir em termos de, inicialmente, dispensa de componente das matrizes com alta taxa de comprometimento ambiental no seu processo de fabricação, e com relação à eficiência nas propriedades mecânicas, há uma conservação na durabilidade, pelo menos a priori.

Para uma correta noção da estabilidade do módulo dos concretos, de forma análoga à resistência, construiu-se curvas na tentativa de descrever a evolução, ou ainda o modelo de crescimento, dessa propriedade. A figura 47 traz as médias dos módulos e o formato de curva logarítmico para cada grupo de concreto.

Figura 47 – Curvas que melhor representam a evolução do módulo de elasticidade dos concretos.

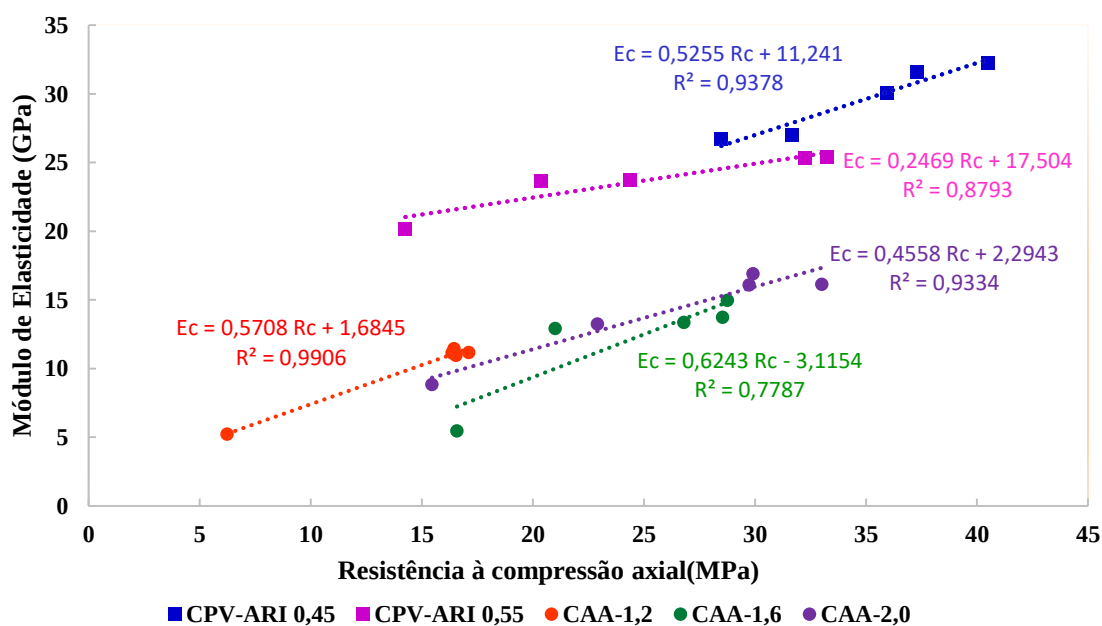


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os formatos logarítmicos são, visualmente, uma escolha de alta pertinência. Porém, o fator de proximidade dos valores base para com as curvas retratam de maneira opositora a validade dos moldes. O concreto CAA-1,2 é de fato a amostra que fornece a maior instabilidade em termos de características mecânicas, em que tanto na propriedade do módulo de elasticidade, quanto na resistência à compressão axial, há um crescimento único até os três dias de idade, com posterior constância dos parâmetros. Os demais concretos alternativos ($\xi = 1,6$ e $\xi = 2,0$) têm maior proximidade com os concretos de alta resistência inicial, pois há uma elevação dos valores mais declarada, em especial entre as idades de 1 e 14 dias.

Conforme a estimativa fornecida pela NBR 6118:2014, o módulo de elasticidade dos concretos referência pode ser estimado em uma idade entre 7 e 28 dias. O módulo de elasticidade também pode ser analisado em concomitância com a resistência à compressão axial. A figura 48 evidencia as duas propriedades mecânicas entre as idades de 1 e 28 dias.

Figura 48 – Módulo de elasticidade versus resistência à compressão axial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio da interpretação das curvas, as quais foram geradas com formato linear, observa-se valores do R^2 próximos aos encontrados pela figura 5.7, isso para os concretos referência. Percebe-se, ainda, que para os concretos CAA-1,2 e CAA-2,0, a relação linear entre o módulo e a resistência é plausível, fato este justificado pelo valores de R^2 . Em contrapartida, a amostra CAA-1,6 mostrou uma instabilidade no modelo linear, com R^2 na faixa de 0,78.

Utilizando a expressão 13, tem-se o valor do módulo de elasticidade inicial (E_{ci}) para os concreto CPV-ARI 0,45 e CPV-ARI 0,55. Portanto, utilizando as equações identificadas pelas curvas da figura 5.7 e, através expressão 15 normatizada, os valores dos módulos podem ser calculados via NBR 6118:2014 e comparados com os resultados dos ensaios. A tabela 12 traz os resultados de ambos os módulos de elasticidade (CPV-ARI 0,45 e CPV-ARI 0,55), para as idades de 7, 14 e 28 dias.

Tabela 12 – Comparativo módulo de elasticidade NBR 6118:2014.

<i>Módulo aos 7 dias</i>					
<i>Amostra</i>	<i>f_{ck} (MPa)</i>	<i>E_{ci} (MPa)</i>	<i>f_{ckj} (MPa)</i>	<i>E_{ci} (7) (MPa) – NBR 6118:2014</i>	<i>$E_{figura\ 5.7}$ (MPa)</i>
CPV-ARI 0,45	36,42	33796,71	35,20	33223,43	29781,46
CPV-ARI 0,55	29,01	30159,54	20,71	25483,25	23868,09
<i>Módulo aos 14 dias</i>					
<i>Amostra</i>	<i>f_{ck} (MPa)</i>	<i>E_{ci} (MPa)</i>	<i>f_{ckj} (MPa)</i>	<i>E_{ci} (14) (MPa) – NBR 6118:2014</i>	<i>$E_{figura\ 5.7}$ (MPa)</i>
CPV-ARI 0,45	36,42	33796,71	33,67	32494,07	31090,33
CPV-ARI 0,55	29,01	30159,54	27,76	29507,78	24920,35
<i>Módulo aos 28 dias</i>					
<i>Amostra</i>	<i>f_{ck} (MPa)</i>	<i>E_{ci} (MPa)</i>	<i>f_{ckj} (MPa)</i>	<i>E_{ci} (28) (MPa) – NBR 6118:2014</i>	<i>$E_{figura\ 5.7}$ (MPa)</i>
CPV-ARI 0,45	36,42	33796,71	36,42	33796,71	32399,20
CPV-ARI 0,55	29,01	30159,54	29,01	30159,54	25972,62

Nota: os valores de f_{ck} e f_{ckj} são os valores médios identificados da resistência à compressão axial, descontado o desvio padrão (-1,65s). O parâmetro αE utilizado foi de 1,0.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As curvas com formato logarítmico, para os concretos referência, fornecem uma estimativa para o módulo de elasticidade menor que a oferecida pela NBR 6118:2014. Em termos de variação, os concretos CPV-ARI 0,55 apresentaram, conforme as idades de 7, 14 e 28 dias, os seguintes percentuais: 6,3%, 15,5% e 13,9%. Para o CPV-ARI 0,45, aos 7, 14 e 28 dias tem-se, respectivamente: 10,4%, 4,3% e 4,2%. De maneira geral, os módulos de elasticidade conforme o ensaio apresentaram valores inferiores às especificações da NBR 6118:2014. Entretanto, a sensibilidade característica do procedimento de ensaio influencia

diretamente no valor final da propriedade, que é conforme a inclinação do tramo elástico da curva tensão x deformação.

Com relação aos concretos alternativos, a literatura traz que, evidentemente, o módulo de elasticidade nos concretos geopoliméricos são inferiores se comparados a uma mesma classe de concreto convencional. Mediante levantamento bibliográfico abordado por Singh *et al.* (2015), é possível analisar se existe coerência nos valores encontrados pelos ensaios destrutivos. Os autores dão ênfase em alguns trabalhos. Por exemplo, um concreto geopolimérico à base de cinza volante (molalidade 10-16M) trouxe resistências à compressão axial entre 30 e 80 MPa e módulo de elasticidade entre 23 e 31 GPa. Já um outro trabalho, também com os concretos geopoliméricos à base de cinza volante (molalidade 8-12,5M) como instrumento de análise, apresentaram resistências à compressão axial na faixa de 29 a 43,5 MPa e módulo de elasticidade na faixa de 10,7 a 18,4 GPa. Os concretos que evidenciaram as melhores propriedades tiveram uma distinção intrínseca em sua dosagem: uma menor relação entre o ativador e o aglomerante, o que traduz numa maior quantidade do aglomerante em detrimento do ativador. Os últimos resultados apresentados são os intervalos referentes aos grupos CAA-1,6 e CAA-2,0, apesar da distinta constituição de ambas as matrizes de concreto geopolimérico. Apesar dos diferentes materiais utilizados como aglomerante, o metacaulim possui eficiência indiscutível, vide as inúmeras pesquisas com as argamassas geopoliméricas à base desse material.

É importante considerar que os resultados expostos por Singh *et al.* (2015) são de componentes submetidos à cura térmica no entorno de 24 horas após moldagem das amostras, procedimento este que não foi adotado nos concretos de tipologia CAA. Em acréscimo, o uso do ativador convencional (silicato de sódio ou silicato de potássio) se fez presente nos concretos da literatura. Em suma, para uma mesma classe de concreto, uma tipologia de um concreto ativado alcalinamente poderá apresentar módulo de elasticidade inferior, se comparado ao concreto convencional.

4.2.3 Resistência à tração por compressão diametral

A tabela 13 reúne as resistências à compressão diametral acompanhadas do coeficiente de variação próprios de cada amostragem considerada. As tensões foram calculadas mediante o ajuste da carga de ruptura, conforme a expressão 6.

Tabela 13 – Resistência à tração por compressão diametral (MPa).

Amostra	7 dias	28 dias	90 dias
CAA-1,2	$1,37 \pm 0,05$	$1,37 \pm 0,11$	$1,40 \pm 0,04$
CAA-1,6	$2,77 \pm 0,13$	$2,79 \pm 0,07$	$2,90 \pm 0,13$
CAA-2,0	$3,21 \pm 0,10$	$3,32 \pm 0,01$	$3,48 \pm 0,45$
CPV 0,55	$3,30 \pm 0,04$	$3,74 \pm 0,04$	$4,20 \pm 0,27$
CPV 0,45	$4,03 \pm 0,08$	$4,88 \pm 0,37$	$5,52 \pm 0,18$

Nota: os valores identificados correspondem ao ensaio da tração indireta $f_{ct,sp}$ (NBR 7222-2011), necessitando portanto da correção de 0,9 para os comparativos com a resistência à tração direta (NBR 6118-2014).

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As resistências adquirem seus valores limite na idade de sete dias, mantendo-os para as idades subsequentes, com exceção dos concretos de referência, em que existe, inicialmente, uma possível elevação dos valores de resistência. O desvio padrão das amostras demonstra baixa variabilidade com relação aos valores médios levantados. Os concretos se caracterizam por serem materiais de baixa resistência à compressão diametral. Fica observado um aumento na resistência à compressão diametral à medida que a solução ganha em quantitativo de CCA (aumento da relação molar ξ). Portanto, da amostra CAA-1,2 até a amostra CAA-2,0 há um crescimento significativo na propriedade analisada.

As resistências à tração por compressão diametral dos concretos referência podem ser estimadas conforme a NBR 6118:2014. Seguem os valores calculados, para os 28 dias de idade, conforme a norma e os valores de ensaio (tabela 14):

Tabela 14 – Comparativo resistência à tração direta NBR 6118:2014.

<i>Resistência À Tração Por Compressão Diametral aos 28 dias</i>			
<i>Amostra</i>	<i>f_{ck} (MPa)</i>	<i>$f_{ct,m}$ (MPa) – NBR 6118:2014</i>	<i>$f_{ct,sp}$ (MPa) – NBR 7222:2011 $\times 0,9$</i>
CPV-ARI 0,45	36,42	3,30	4,40
CPV-ARI 0,55	29,01	2,83	3,37

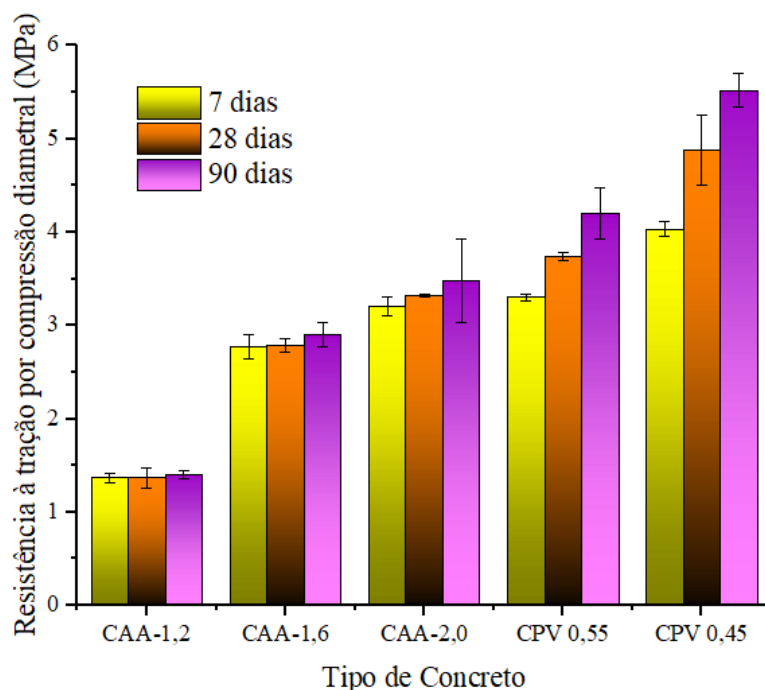
Nota: os valores de f_{ck} são os valores médios identificados da resistência à compressão axial, descontado o desvio padrão (-1,65s). Os valores $f_{ct,m}$ de são as resistência à tração estimadas conforme o f_{ck} . A resistência à tração indireta (NBR 7222:2011) é corrigida para a equiparação com a resistência à tração direta (NBR 6118:2014).

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se uma clara aproximação entre os valores, de maneira que, em termos de variação percentual, a amostra CPV-ARI 0,45 trouxe 33,3%, comparando o valor de resistência calculado pela NBR 6118:2014 e o ensaio normatizado pela NBR 7222:2011, enquanto que a amostra CPV-ARI 0,55 apresentou uma variação maior, a qual em termos quantitativos foi de 19,1%.

Com relação aos concretos ativados alcalinamente, Singh *et al.* (2015) abordam que os valores de resistência à tração por compressão diametral de algumas pesquisas analisadas se encontram na faixa de 3 a 6 MPa. É mister acrescentar que cada concreto geopolimérico estudado apresenta suas particularidades, seja nos materiais componentes (uso ou não do silicato de sódio, aglomerante alternativo selecionando, por exemplo), seja nos parâmetros de dosagem (molalidade, relações em massa e molar). De maneira geral, os concretos geopoliméricos apresentam valores similares aos concretos convencionais, ambos os grupos apresentando valores inferiores da propriedade analisada.

A figura 49 ilustra os valores médios da resistência à tração por compressão diametral, acompanhados dos seus respectivos desvios.

Figura 49 – Resistência à tração por compressão diametral (MPa).

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Verifica-se uma maior proximidade entre o grupo CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55, aproximando-os, inicialmente para a mesma resistência à tração por compressão diametral. O concreto CPV-ARI 0,45 evidencia um desempenho maior no que diz respeito ao ensaio analisado, fato também observado nas propriedades de resistência à compressão axial e no módulo de elasticidade.

Para uma avaliação estatística mais específica, os testes ANOVA e TUKEY fornecem a existência de variações significativas entre os grupos analisados. No intuito de buscar as variações entre os grupos de concretos ativados alcalinamente e os grupos de concreto referência, a figura 49 retrata uma aproximação inicial entre os grupos CAA-1,6, CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55, e portanto, os teste serão procedidos nessas amostras, para as idades de sete, 28 e 90 dias.

Tabela 15 – Testes ANOVA e TUKEY, resistência à tração por compressão diametral, para as amostras CAA-1,6, CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55.

ANOVA (único fator) - 7 DIAS						
<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,497933	2	2,248967	25,473	0,000613	4,737414
Dentro dos grupos	0,618018	7	0,088288		HÁ DIFERENÇA SIGNIFICATIVA!!	
Total	5,115951	9				
TUKEY (único fator) - 7 DIAS						
<i>Amostra</i>	CAA-1,6		CAA-2,0		CPV 0,55	
CAA-1,6				0,0039		0,0007
CAA-2,0	7,059				0,3071	
CPV 0,55	9,478		2,262			
ANOVA (único fator) - 28 DIAS						
<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,394863	2	1,197432	12,44126	0,007334	5,143253
Dentro dos grupos	0,577481	6	0,096247		HÁ DIFERENÇA SIGNIFICATIVA!!	
Total	2,972344	8				
TUKEY (único fator) - 28 DIAS						
<i>Amostra</i>	CAA-1,6		CAA-2,0		CPV 0,55	
CAA-1,6				0,1703		0,0069
CAA-2,0	2,968				0,0634	
CPV 0,55	7,037		4,069			
ANOVA (único fator) - 90 DIAS						
<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,575746	2	1,287873	13,29132	0,006244	5,143253
Dentro dos grupos	0,581375	6	0,096896		HÁ DIFERENÇA SIGNIFICATIVA!!	
Total	3,157121	8				
TUKEY (único fator) - 90 DIAS						
<i>Amostra</i>	CAA-1,6		CAA-2,0		CPV 0,55	
CAA-1,6				0,1319		0,0052
CAA-2,0	3,252				0,0679	
CPV 0,55	7,242		3,991			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

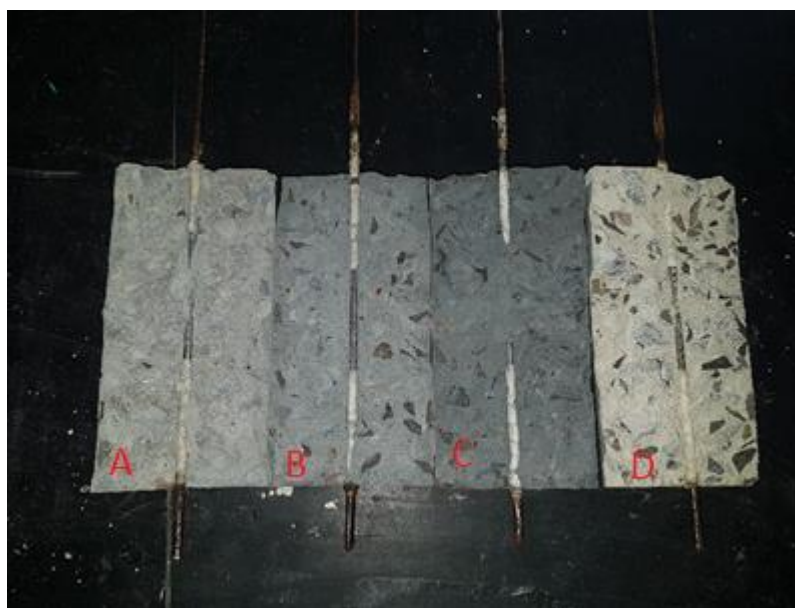
Como foi verificado que $F > F_{\text{crítico}}$, existe variação significativa entre os grupos de concreto analisados. Para uma análise de grupo a grupo, o teste de Tukey fornece essa variação buscada. Os valores indicados menores que 0,05 exprimem que há variação significativa entre os grupos em questão trabalhados. Logo, as amostras de concreto CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55 não apresentam variações significativas entre si (aos sete dias de idade). Entretanto, comparadas ao grupo CAA-1,6, as variações possuem certa significância.

Nota-se que o concreto CPV-ARI 0,55 se distingue do concreto alternativo CAA-1,6, de acordo com o teste de Tukey. Essa fato se comprova em todas as idades avaliadas (7, 28 e 90 dias). Já com relação ao concreto CAA-2,0, este não apresenta diferença significativa para com o referência CPV-ARI 0,55, em todas as idades avaliadas, uma vez que os valores acima da diagonal principal do teste de Tukey não fornecem valores abaixo da aceitação de 5% (cédulas marcadas em vermelho). Portanto, em termos de resistência à tração por compressão diametral, o concreto alternativo CAA-2,0 apresenta um valor da propriedade analisada sem diferenças significativas se comparado ao referência CPV-ARI 0,55, e, em acréscimo, em idades mais avançadas (28 e 90 dias), ambos os concretos ativados alcalinamente com relação molar $\xi = 1,6$ e $\xi = 2,0$ também não apresentam distinções significativas.

4.2.4 Aderência da interface concreto/aço

Para efeito de avaliação visual das amostras após o ensaio de arrancamento, a figura 50 traz ilustração da parte interna dos corpos de prova.

Figura 50 – Corpos de prova após o ensaio de arrancamento.



Nota: A – CAA-1,2; B – CAA-1,6; C- CAA-2,0; D – CPV-ARI.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Mediante o comprimento de aderência que foi definido na metodologia, em todos os grupos de concreto, para todas as idades ensaiadas, houve deslizamento da barra de aço, ou ainda a ruptura da ligação entre a matriz e a barra, assim ilustrado pela figura 51. Portanto os demais tipos de ruptura da ligação abordado por Zhang *et al.* (2018) não foram constatados, não havendo nenhuma ruptura ou desgaste no concreto, ou ainda, nenhuma combinação de falha direta na ligação aço/concreto e ruptura do corpo-de-prova de concreto.

Figura 51 – Modo de ruptura do ensaio - CP's pós arrancamento.

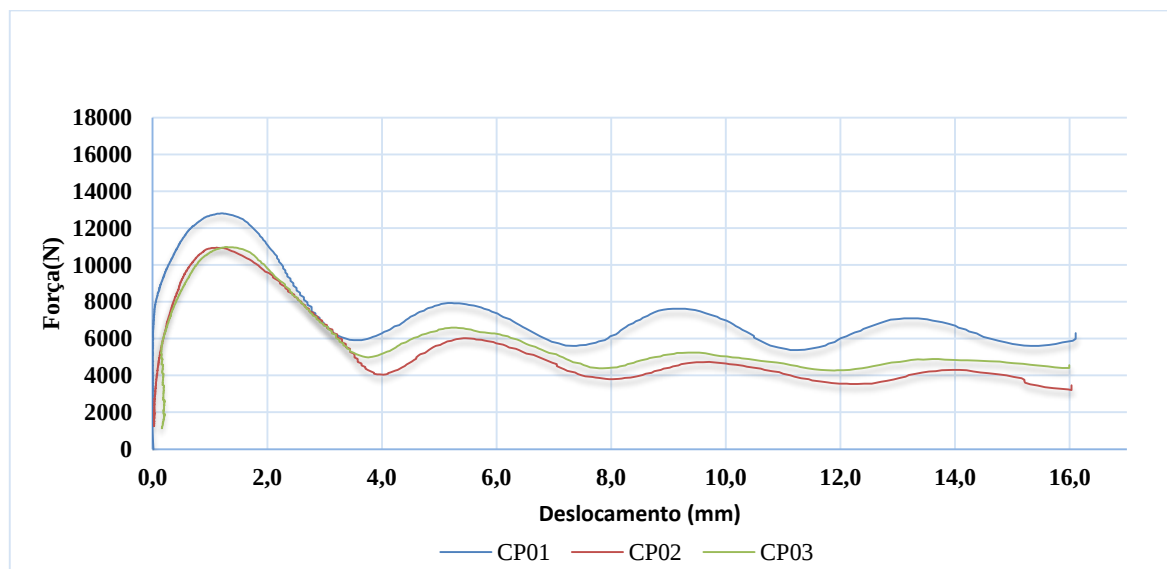


Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2.4.1 Concretos de alta resistência inicial (CPV-ARI 0,45)

Conforme citado no procedimento experimental do trabalho, o ensaio de arrancamento fornecerá os resultados conforme a figura 52. De maneira geral, para a coleta do escorregamento da barra de aço, utilizou-se o espaço amostral de três corpos-de-prova, sendo que a curva resultante é de acordo com as três individuais. A figura 52 traz um exemplo das curvas das amostras referentes ao CPV-ARI 0,45. É importante salientar que o intuito foi sempre trabalhar com curvas próximas, para que houvesse a correta interpretação do resultado último, além da maior coerência ao afirmar um certo comportamento padrão.

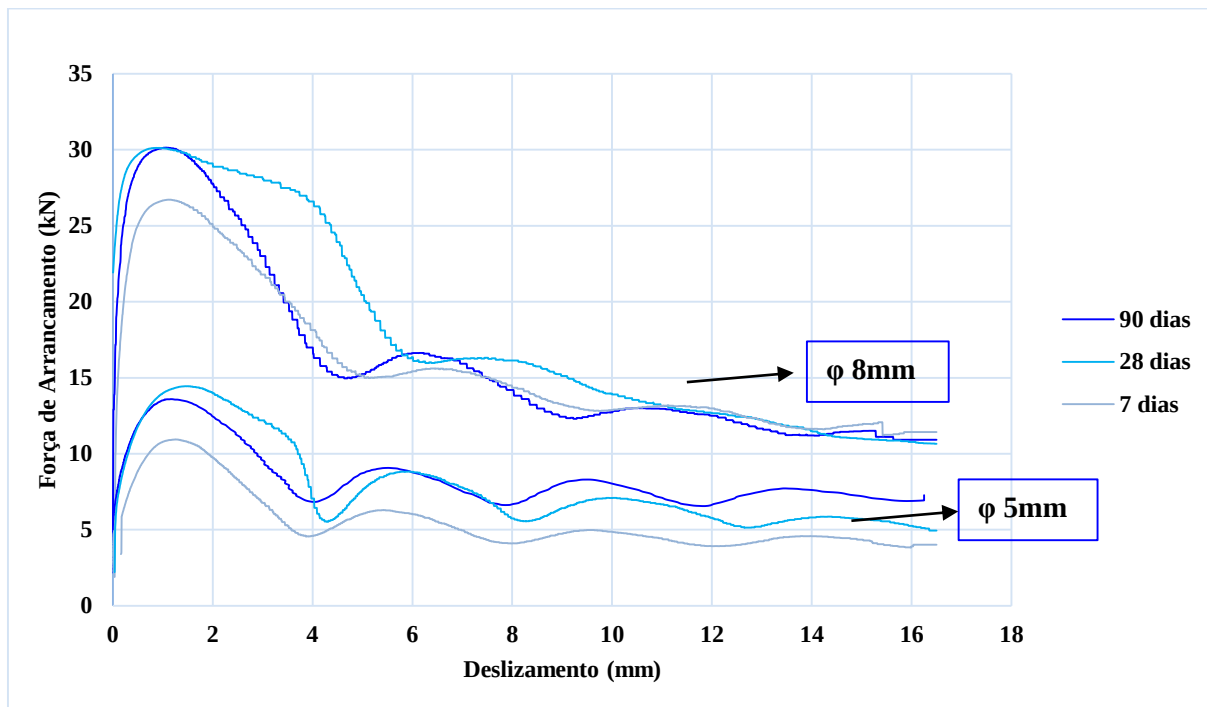
Figura 52 – Curva força de arrancamento por escorregamento da barra de aço; três amostras de concreto **CPV-ARI 0,45**, aos sete dias, com diâmetro da barras de 5 mm.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De posse das três curvas de arrancamento base, na sequência foi realizada as médias das curvas, sendo possível determinar a tensão de aderência média do concreto. Esse procedimento se repete para as demais idades e para a barra de 8 mm de diâmetro (figura 53). Observando a figura 52, nota-se uma similaridade entre as curvas, com o alcance da força de arrancamento na média de 11kN, com arranque da armadura marcada no deslocamento médio de 1,5mm. Passado o escorregamento da barra, existe uma clara oscilação na curva, até que não haja mais atrito residual da matriz de concreto com a armadura.

Figura 53 – Curva força de arrancamento por escorregamento da barra de aço; concreto CPV-ARI 0,45.



Nota: os Apêndices A, B e C trazem alguns pontos específicos que descrevem as curvas apresentadas.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As curvas apresentadas na figura 53 evidenciam o comportamento clássico de aderência do concreto com as barras de aço estruturais. Um patamar é atingido, em termos de força, no momento em que há o efetivo deslizamento da barra, de maneira que a ligação entre os materiais é suprimida e portanto o vergalhão adquire liberdade para se deslocar. O ponto de arranque da barra de aço é observado de maneira recorrente no deslizamento marcado próximo de 1 milímetro, para todos os diâmetros das barras e todas as idades consideradas.

Contudo, alguns patamares foram observados, em especial nas curvas aos 28 dias para ambos os diâmetros de barra. As quedas nas forças de tração possuem uma resistência, mesmo após o arranque das barras, o que pode ser justificado pelo atrito residual atuante entre a matriz de concreto e a barra de aço. A aderência manifesta-se de maneira similar nas curvas, com a predominância da aderência de caráter mecânica na interface concreto/aço. Atribui-se as ondulações formadas após o deslizamento integral da barra a uma aderência residual de atrito, ou ainda, as engrenagens residuais formadas conforme as nervuras nas barras provocam essa resistência ao deslizamento, mesmo após a força de arrancamento ter

sido atingida. Nota-se o mesmo comportamento da curva de aderência aos 90 dias de idade; a princípio, não há ganhos vertiginosos na tensão de aderência para ambas as barras.

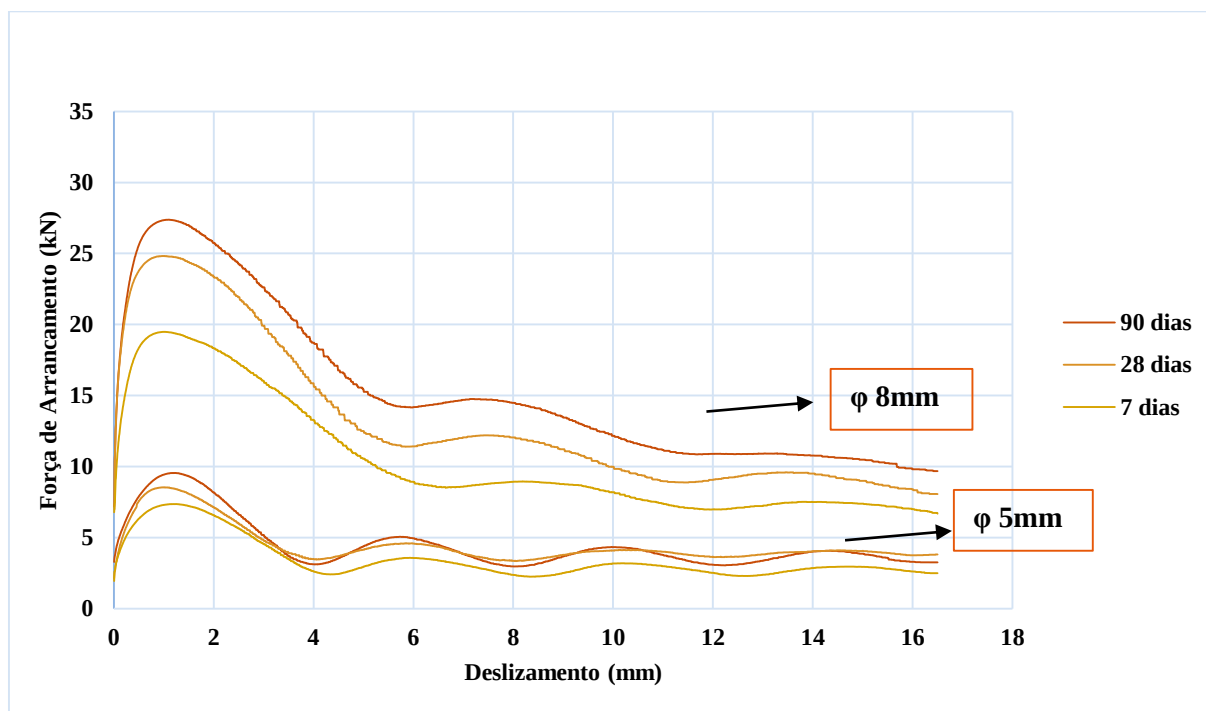
A rugosidade das barras de aço tem peso fundamental na avaliação da aderência. Uma vez que as barra nervuradas fornecem as chamadas “engrenagens mecânicas” na interface aço/concreto, outro fator também a ser considerado é o grau de oxidação das barras, conforme exposto por Fusco (1995). Essa oxidação, apesar de não quantificada e analisada detalhadamente, estava presente nos vergalhões utilizados, em especial os de diâmetro 8mm.

Existe um comportamento pós arranque observado em menor patamar nas barras com diâmetro de 5 milímetros; esse fato está pautada na área de contato ser efetivamente menor, se comparada às barras de 8 milímetros, e portanto esperam-se forças menores para provocar o deslizamento da barra.

4.2.4.2 Concretos de alta resistência inicial (CPV-ARI 0,55)

O segundo grupo de concreto CPV-ARI analisado trouxe as seguintes curvas de arrancamento expostas pela figura 54:

Figura 54 – Curva força de arrancamento por escorregamento da barra de aço; concreto CPV-ARI 0,55.



Nota: os Apêndices A, B e C trazem alguns pontos específicos que descrevem as curvas apresentadas.

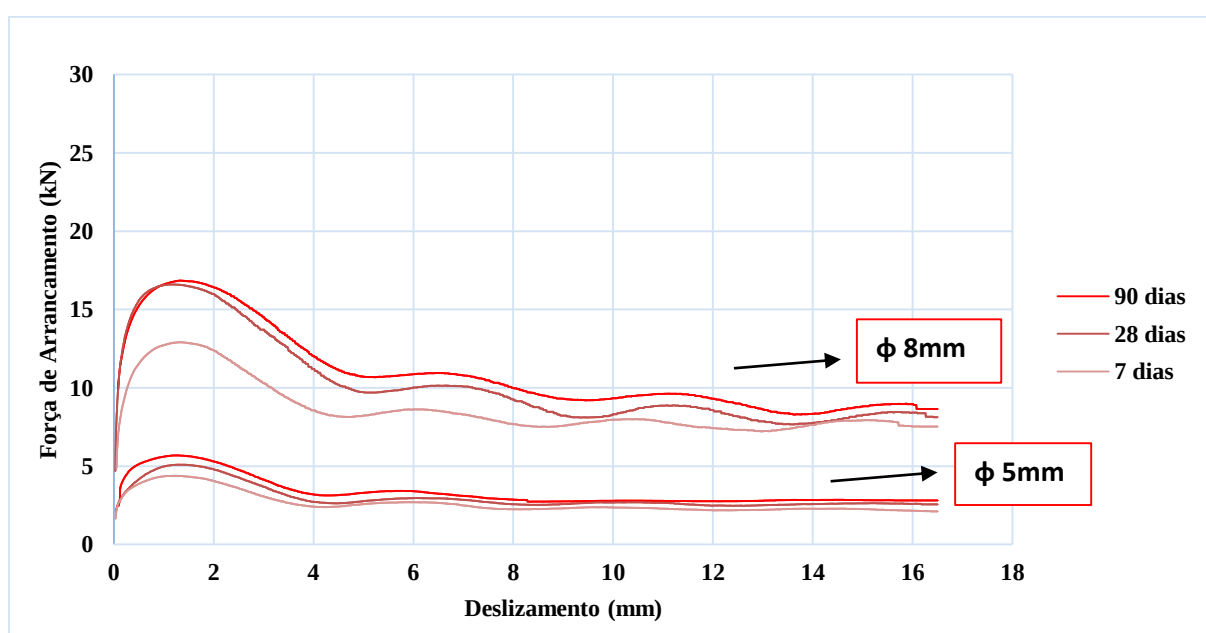
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observam-se curvas com o mesmo formato das obtidas para o CPV-ARI 0,45, com a principal distinção no valor da força de arrancamento. As barras de maior diâmetro demonstram uma maior ganho de aderência na transição entre as idades, de maneira que aos 90 dias estima-se uma força de arranque no entorno de 27 kN. Analogamente ao que foi observado na amostra de concreto referência com maior fator água/cimento, as barras deslizam por completo, ou seja, se desprendem do concreto circunvizinho por conta da ruptura da ligação, no entorno de 1 mm de deformação marcada. O tramo inicial das curvas referentes ao diâmetro de 8 milímetros possui uma inclinação maior, o que se justifica pela presença da aderência por atrito em menor escala somada a uma maior aderência mecânica em razão da presença das nervuras, e uma maior preponderância destas nas barras de diâmetros maiores.

4.2.4.3 Concretos ativados alcalinamente (CAA-1,2)

A amostra identificada por CAA-1,2, em relação ao diâmetros de 5mm e 8mm para os vergalhões de aço, trouxe o seguinte comportamento da força de tração pelo deslocamento longitudinal da barra (figura 55):

Figura 55 – Curva força de arrancamento por escorregamento da barra de aço; concreto CAA-1,2.



Nota: os Apêndices A, B e C trazem alguns pontos específicos que descrevem as curvas apresentadas.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A análise do gráfico da figura 55 fornece um acréscimo na força de arrancamento entre as idades de cura de 7 e 28 dias, em especial para o vergalhão de aço de 8 milímetros. As curvas correspondentes da barra de 5 milímetros de diâmetro denotam uma clara manutenção da força de arrancamento conforme o avanço nas idades. Aos 90 dias, não há ganho expressivo na aderência entre o concreto ativado alcalinamente CAA-1,2 e o aço. Tal constatação também foi observada nas demais propriedades dos concretos CAA.

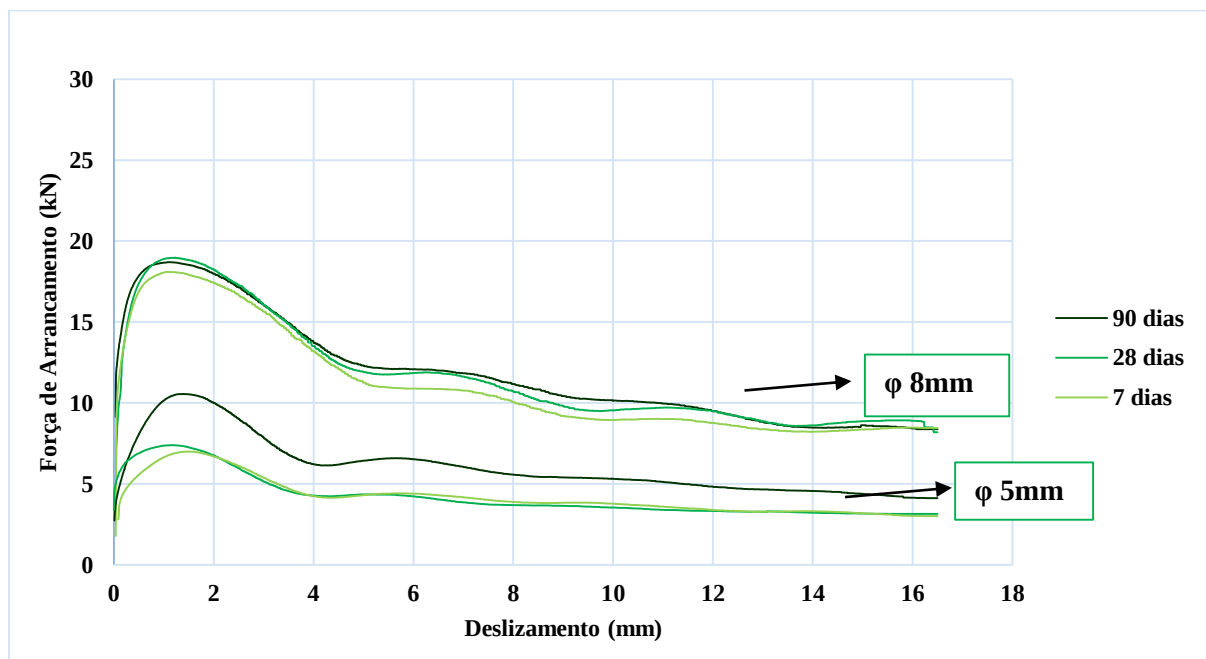
As curvas denotam um comportamento similar ao que se espera da aderência entre o aço e o concreto convencional. As parcelas de aderência por adesão e aderência mecânica também são evidenciadas nas curvas, porém, é clara a tensão final de aderência reduzida para a tipologia CAA-1,2.

Fazendo um comparativo com o resultado proveniente das amostras CPV-ARI 0,45 e CPV-ARI 0,55, há um distanciamento entre os resultados encontrados. De maneira análoga à força de arrancamento obtida, os concretos CAA-1,2 também se mostraram distantes dos concretos referência em termos de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral. Pode-se afirmar que o distanciamento é devido aos valores encontrados para cada propriedade, porém, em termos comportamentais algumas similaridades foram evidenciadas entre a amostra CAA-1,2 e os concretos convencionais, em especial nas curvas de aderência apresentadas.

4.2.4.4 Concretos ativados alcalinamente (CAA-1,6)

A amostra identificada por CAA-1,6, em relação ao diâmetros de 5mm e 8mm para os vergalhões de aço, trouxe o seguinte comportamento da força de tração pelo deslocamento longitudinal da barra (figura 56):

Figura 56 – Curva força de arrancamento por escorregamento da barra de aço; concreto CAA-1,6.



Nota: os Apêndices A, B e C trazem alguns pontos específicos que descrevem as curvas apresentadas.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A amostra identificada por CAA-1,6 fornece curvas com descrição análoga às observadas para a tipologia CAA-1,2. Contudo, como já constatado nas demais propriedades mecânicas, a amostra CAA-1,6 apresenta, também, uma tensão de aderência superior na interface concreto/aço.

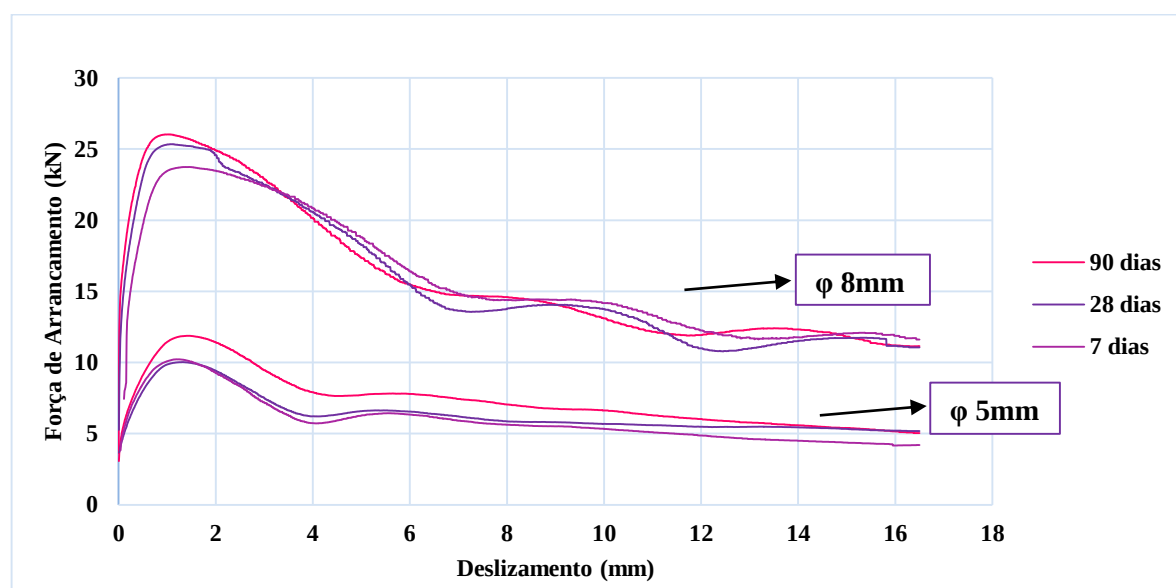
Os ganhos entre as idades de 7 e 28 dias são ligeiros; há uma constância no comportamento das curvas, sendo que para a barra de 5 milímetros, há uma menor oscilação pós-arranque, o que pode ser justificada pela área de contato inferior, levando a um atrito residual menos expressivo. Essa área de contato se traduz no aparecimento das “engrenagens mecânicas” que são formadas conforme as nervuras das barras de aço. Acredita-se que essa rugosidade remeta a um atrito residual que se manifesta após o arrancamento da barra.

A barra de 8 milímetros possui, de fato, maior força de arrancamento, vide sua maior área de contato. O seu esboço oscilatório a partir do deslizamento de 5 milímetros se replica em ambas as idades analisadas. Em relação à aderência aos 90 dias, observa-se, de início, uma maior elevação na tensão de aderência para a barra de 5 milímetros. Há uma constância da força de arrancamento no vergalhão de 8 milímetros. A variabilidade e as distinções significativas serão abordadas pelos testes estatísticos na própria análise da tensão de aderência final.

4.2.4.5 Concretos ativados alcalinamente (CAA-2,0)

A amostra identificada por CAA-2,0, em relação ao diâmetros de 5mm e 8mm para os vergalhões de aço, trouxe o seguinte comportamento da força de tração pelo deslocamento longitudinal da barra (figura 57):

Figura 57 – Curva força de arrancamento por escorregamento da barra de aço; concreto CAA-2,0.



Nota: os Apêndices A, B e C trazem alguns pontos específicos que descrevem as curvas apresentadas.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Verifica-se uma clara manutenção dos formatos de curvas, de forma que, evidentemente, a barra de aço de 5mm de diâmetro é arrancada da matriz de CAA com uma força menor; é notório, ainda, a clara oscilação inicial pós escorregamento, em específico entre os deslocamentos marcados entre 2 e 6 milímetros. Há, sequencialmente uma caminhada em direção à linearização da força de arranque pelo deslocamento do vergalhão, de forma que qualquer atrito residual que possa ter influência perca o seu poderio.

A barra de aço de 8 milímetros apresenta uma maior força de arrancamento, sendo visível uma menor inclinação tangencial da curva ascendente nos gráficos. Observa-se, em conformidade, uma queda menos brusca entre as deformações de 2 a 6 mm, se comparada ao vergalhão de 5 milímetros. Esse escorregamento mais gradual ocorre até que haja a clássica oscilação das curvas, oscilações estas que não possuem característica retilínea, sendo mais

propícias à um comportamento de queda na força de arranque com a elevação do deslizamento da barra de aço.

As curvas de ambos os vergalhões concretizam um ganho não significativo na propriedade de aderência conforme o avanço na idade. De outra forma, o concreto estudado atinge seu potencial em idade recentes. Existe uma similaridade se um comparativo entre as amostras CAA-2,0 e CPV-ARI for montado. Os ganhos são mais expressivos nos concretos de alta resistência inicial, porém o rótulo de compósitos com propriedades de alto poderio em idades curtas pode ser aplicado à amostra CAA-2,0. Resgatando as curvas encontradas para as tipologias de concreto CAA, percebe-se que na ondulações características nas curvas dos concretos referência não aparecem nas curvas dos concretos alternativos.

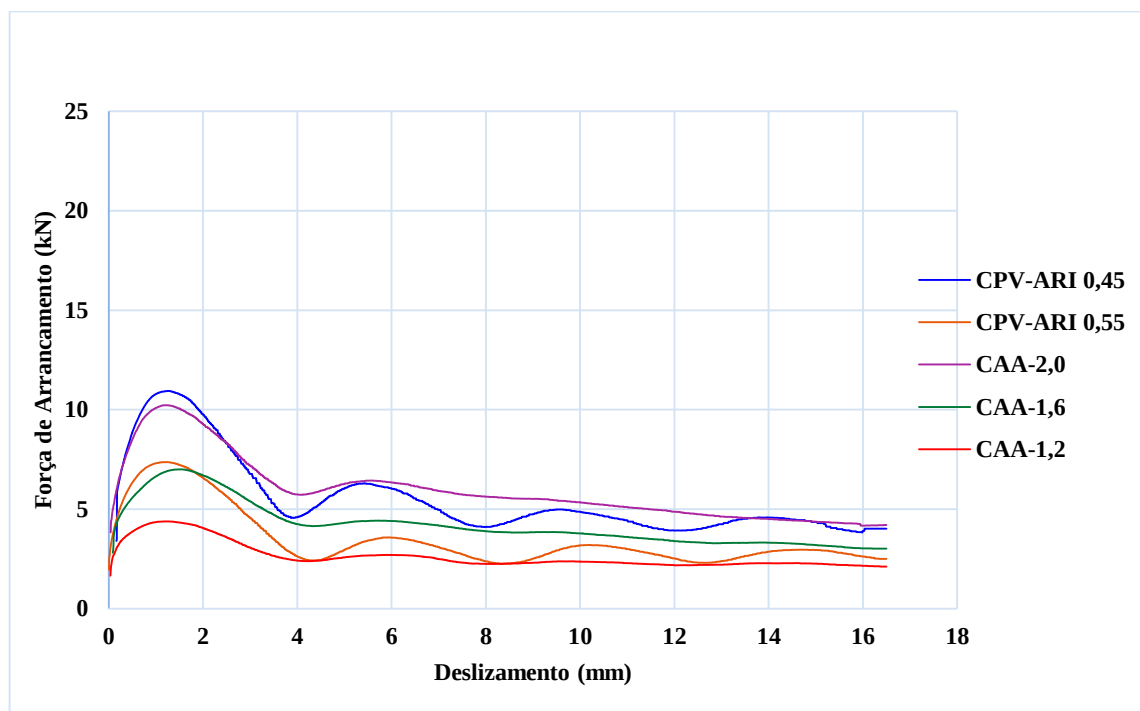
Conforme Al-Azzawi *et al.* (2018), o grau de geopolimerização afeta a microestrutura dos compostos ativados alcalinamente, que consequentemente afeta a tensão de aderência na interface entre o concreto e o aço. Uma vez que a tipologia CAA-2,0 apresenta maior potencialidade na ativação, a microestrutura final desse composto será mais vigorosa. Ainda de acordo com Al-Azzawi *et al.* (2018), o uso de quantidades maiores de aglomerante resultam em microestruturas mais densas e mais compactas, o que é atribuído ao empacotamento das partículas, visto que inclui-se um material mais fino na mistura. Portanto, os vazios entre as partículas de agregado e o aço são preenchidos, resultando numa maior aderência na interface.

O aglomerante utilizado nas amostras CAA foi o metacaulim, com seu valor de dosagem fixo, em que apenas o ativador prévio tinha variação dentro do grupo dos concretos ativados alcalinamente. Logo, a microestrutura na interface concreto/aço é ditada pela geopolimerização nos concretos. Entretanto, vale ressaltar que a utilização de um material fino (metacaulim) contribui no preenchimento dos vazios, conforme Al-Azzawi *et al.* (2018), culminando no melhoramento das propriedades mecânicas nos concretos geopoliméricos.

4.2.4.6 Comparativo das curvas conforme as idades de ruptura

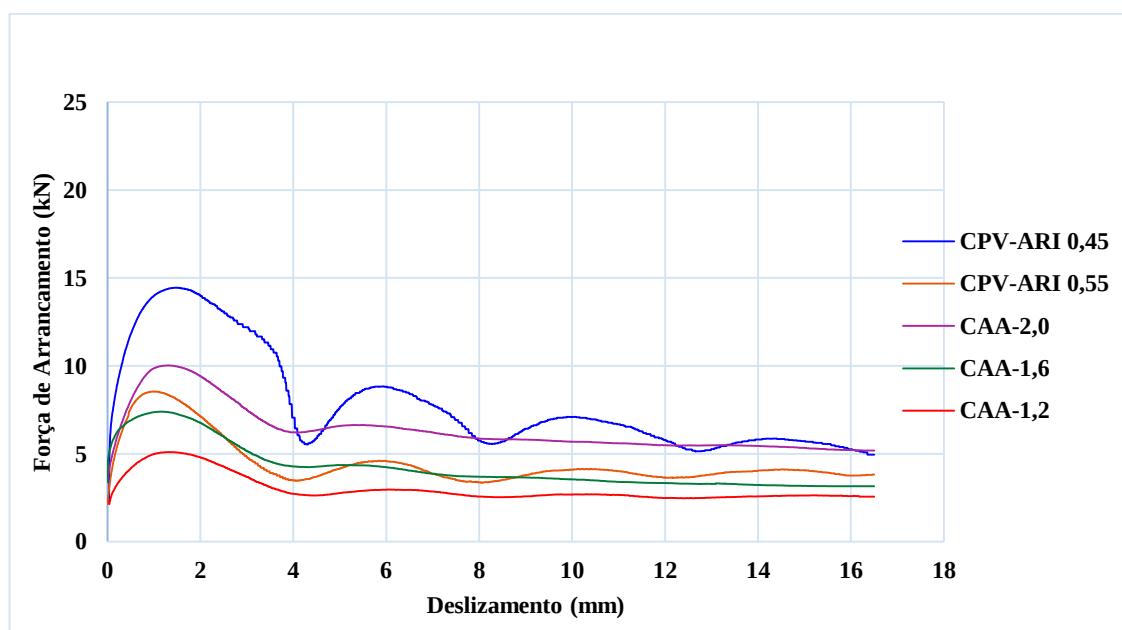
Reunindo as curvas obtidas conforme a idade de ensaio fixada, tem-se os seguintes gráficos (figuras 58 a 63).

Figura 58 – Curvas médias obtidas aos 7 dias de idade, para $\phi 5\text{mm}$.

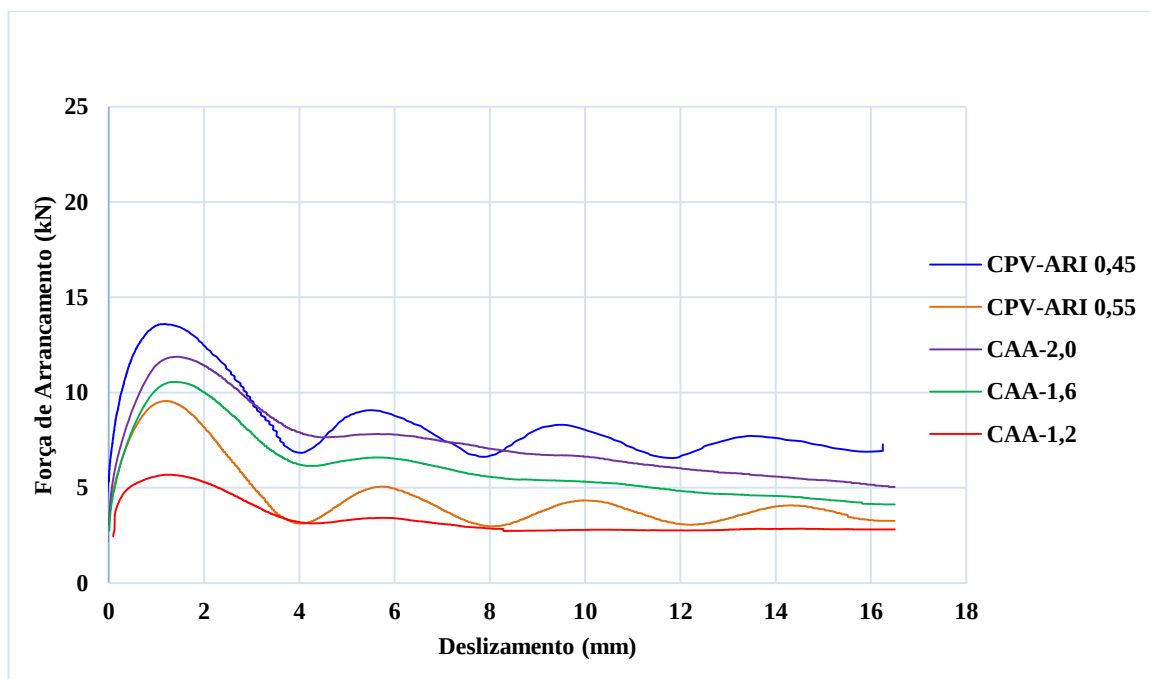


Fonte: Elaboração do próprio autor.

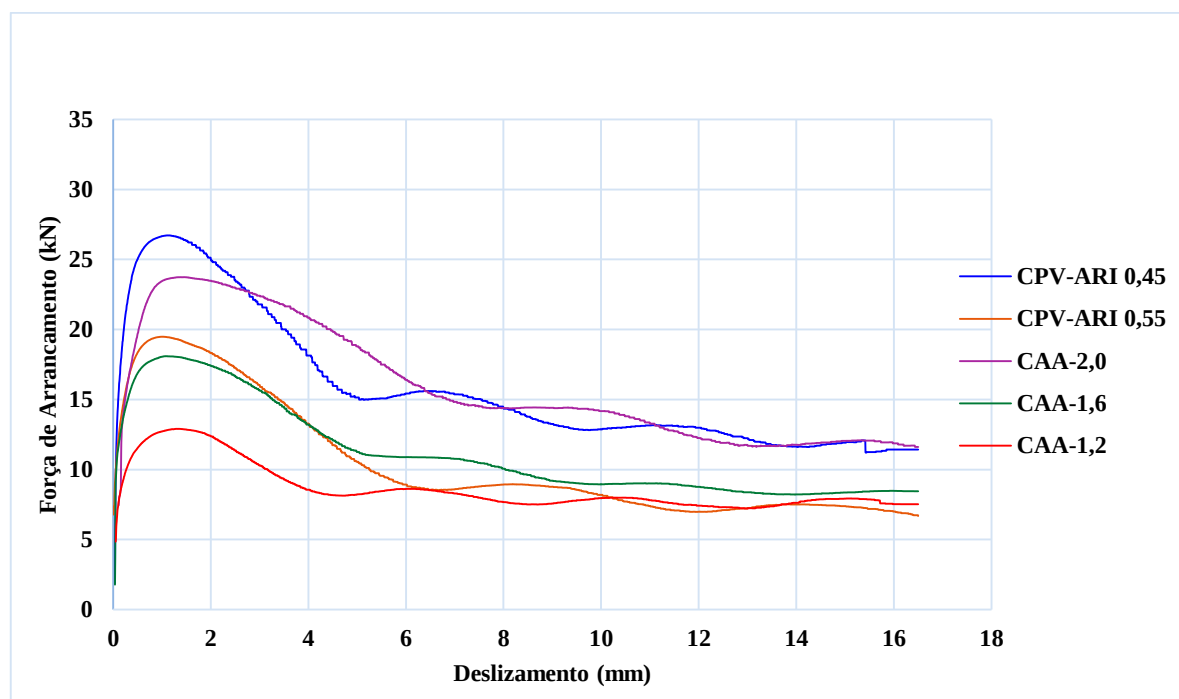
Figura 59 – Curvas médias obtidas aos 28 dias de idade, para $\phi 5\text{mm}$.



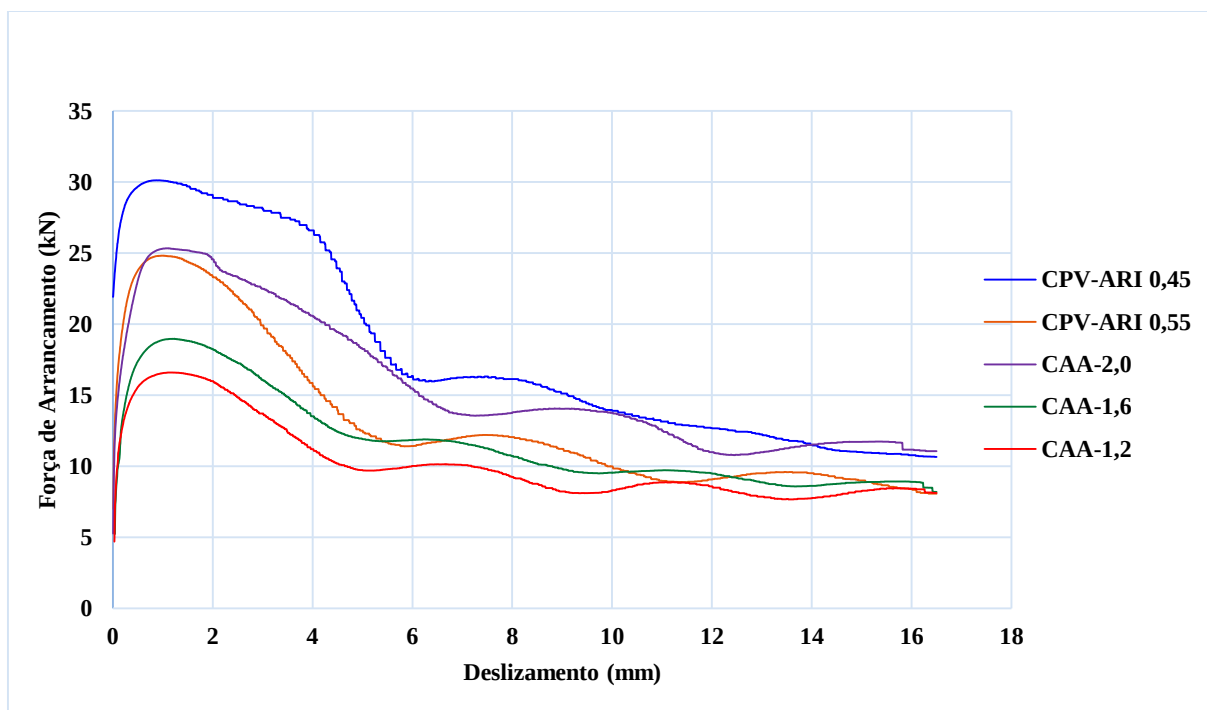
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 60 – Curvas médias obtidas aos 90 dias de idade, para $\phi 5\text{mm}$.

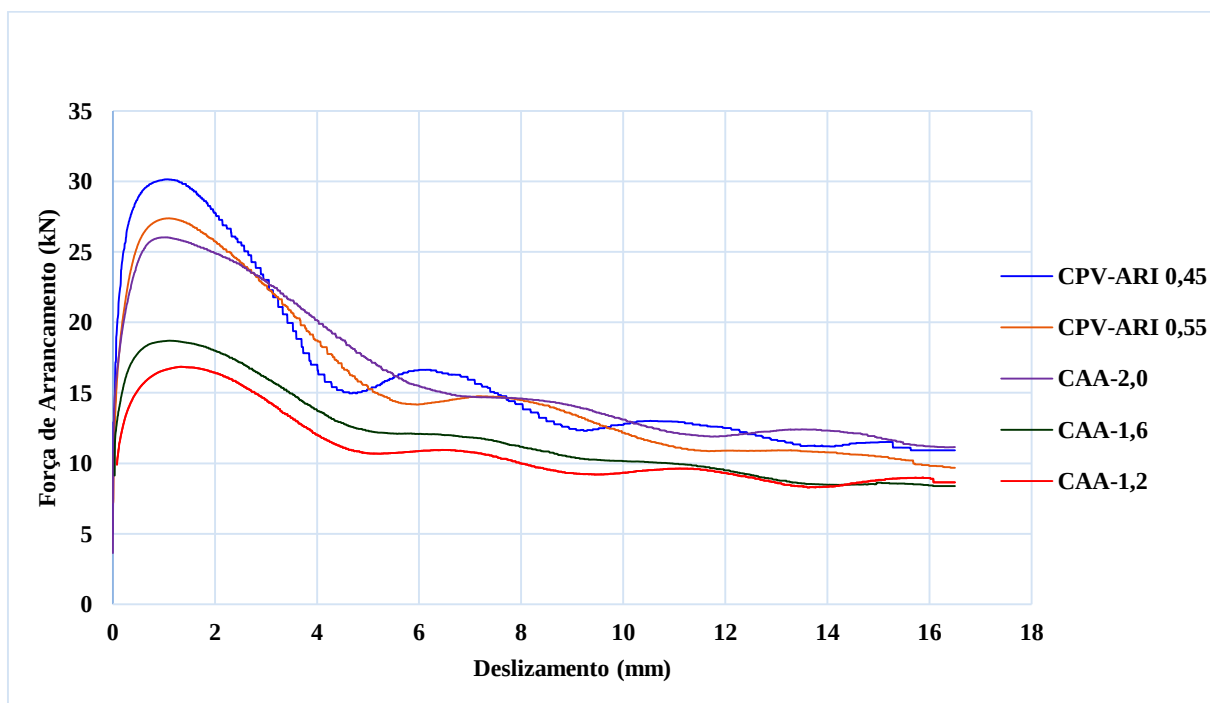
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 61 – Curvas médias obtidas aos 7 dias de idade, para $\phi 8\text{mm}$.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 62 – Curvas médias obtidas aos 28 dias de idade, para $\phi 8\text{mm}$.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 63 – Curvas médias obtidas aos 90 dias de idade, para $\phi 8\text{mm}$.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As curvas obtidas com o ensaio de pull-out possuem formatos também verificados pelas curvas ilustradas por Zhang *et al.* (2018) e Al-Azzawi *et al.* (2018). Os formatos fornecem um indicativo do crescimento da propriedade de aderência conforme os concretos ativados alcalinamente vão apresentando maior taxa de CCA compondo o ativador alcalino. De fato, uma solução ativadora com maior concentração do óxido SiO_2 , o qual advém, inicialmente devido à sua dissolução com 24 horas de antecedência, da cinza da casca de arroz, contribui de maneira direta nas propriedades mecânicas dos concretos, assim observado nas propriedades de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral.

Uma análise conduzida nas amostras aos sete dias de cura, para ambos os diâmetros de barras de aço, solidifica o comportamento dos concretos ativados alcalinamente como de considerável aderência inicial, em especial para a tipologia CAA 2,0 no que faz referência às curvas das barras de 5 milímetros aos sete dias de idade.

Expandindo a análise para os 28 dias de cura, há um crescimento mais expressivo em relação às curvas do concreto referência CVP-ARI 0,45, sendo uma tendência observada nas demais propriedades mecânicas. Portanto, em idades recentes, os concretos CAA demonstram sua capacidade de desempenho próxima de seu valor limite. Entretanto, fica evidenciada uma semelhança, em especial na força de arrancamento, dos concretos CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55.

Uma informação de extrema relevância é o fato dos concretos alternativos CAA-1,6 e CAA-2,0 apresentarem forças de arranque distintas, apesar da verificação de certa proximidade, em especial na resistência à compressão. Nota-se, para o diâmetro de 5 milímetros, há um menor distanciamento dos picos de aderência; o diâmetro de 8 milímetros evidencia uma distinção maior das forças de arrancamento, com a amostra CAA-2,0 superando a amostra CAA-1,6, ao mesmo tempo que se aproxima das curvas obtidas para o CPV-ARI ,55.

Constatou-se que o concreto CAA-2,0 solicitou uma força de tração maior para o arranque da barra de 5 milímetros, se comparado aos concreto CPV-ARI 0,55. Esse comportamento se replicou para as três idades. Analisando o diâmetro de 8 milímetros, aos 7 e 28 dias o concreto CAA-2,0 tem a sua tensão de aderência limite atingida de maneira quase integral, de forma que não há ganho observado aos 90 dias. Essa observação não é evidenciada nos concretos de cimento Portland. O ganho na aderência da interface concreto/aço é gradativo, uma vez que aos sete dias a aderência observada no grupo CPV-ARI 0,55 é menor que no grupo CAA-2,0, porém, aos 90 dias, o primeiro denota uma ligeira superioridade em termos da força de arranque.

Uma distinção clara presente nas curvas de arrancamento é a oscilação posterior ao decréscimo inicial na força de tração. Nos concreto CAA, não há um comportamento oscilatório com a mesma evidência verificada no CPV-ARI 0,45. Entretanto, o crescimento inicial da curva, representado pelo patamar anterior ao arranque das barras, é apresentado de maneira similar entre os grupos de concreto, com o alcance da força de tração necessária para o arrancamento das barras na faixa de 1 milímetro (escorregamento).

Nota-se, aos 90 dias de idade, uma manutenção da força de arrancamento para os concretos. Ganhos expressivos não foram identificados nos concretos alternativos; com relação aos concretos de cimento Portland, os ganhos também não são vertiginosos, entretanto, houve uma maior elevação do pico da curva de arrancamento nos concretos CPV-ARI 0,55, os quais, para ambos os diâmetros dos vergalhões, ultrapassam a priori os picos identificados na amostra CAA-2,0. É importante salientar que as tensões de aderência aos 90 dias desse dois grupos de concreto (CPV-ARI 0,55 e CAA-2,0) serão submetidas à análise estatística para verificação das distinções significativas.

Uma vez que as classes dos concretos ativados alcalinamente foram definidas conforme as resistências à compressão axial, as tipologias de concreto referência CPV-ARI 0,45 e CPV-ARI 0,55 são intransponíveis para uma análise comportamental das curvas de arrancamento. Conforme os resultados apresentados para o grupo CPV-ARI 0,55, é possível aproximar ainda mais os concretos CAA com essa referência levantada, uma vez que em termos de resistências à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral, houve maior proximidade entre as amostras CAA e CPV-ARI 0,55.

4.2.4.7 Tensão de aderência média para os concretos

Reunindo as forças de arrancamento médias referentes à ambos os diâmetros das barra de aço, nas idades de 7, 28 e 90 dias, e conforme a expressão 17, é possível quantificar a tensão de aderência dos concretos. Seguem os dados inerentes:

Tabela 16 – Tensão de aderência média (MPa).

Amostra	Φ5mm			Φ8mm		
	7 dias	28 dias	90 dias	7 dias	28 dias	90 dias
CAA-1,2	4,65 ± 0,03	5,41 ± 0,58	6,37 ± 0,34	8,57 ± 0,94	9,79 ± 1,06	11,17 ± 0,21
CAA-1,6	7,43 ± 0,09	7,86 ± 0,21	11,23 ± 0,17	12,00 ± 0,38	12,67 ± 0,74	12,40 ± 0,34
CAA-2,0	10,39 ± 0,46	10,64 ± 0,10	12,61 ± 0,33	15,39 ± 0,00	16,82 ± 0,26	17,29 ± 0,31
CPV 0,55	7,84 ± 0,22	9,11 ± 0,94	10,18 ± 0,32	12,93 ± 0,53	15,33 ± 1,41	18,16 ± 0,40
CPV 0,45	12,28 ± 0,57	15,11 ± 0,19	14,31 ± 0,25	18,49 ± 0,69	18,61 ± 1,19	20,84 ± 0,76

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A aderência obtida para os concretos traz uma vertente que deve ser analisada de maneira sistemática. Existe um crescimento mais significativo quando o tratamento é das amostras ensaiadas com os vergalhões de 8 milímetros. Essa constatação é válida para os concretos alternativos, de maneira que para a referência CPV-ARI existe ganho nos corpos de prova com ambos os diâmetros das barra de aço.

Da maneira geral, houve maior variação nas idades de 28 dias, fato este que não está conectado diretamente à microestrutura dos concretos ou à alguma característica específica de dosagem. Acredita-se que a variação se encontrou dentro das possíveis imperfeições finais inerentes aos corpos-de-prova e ao posicionamento da barra de longitudinal ao concreto. Porém, apesar do desvio aparecer num valor mais elevado, nada impede de quantificar as tensões de aderência para cada grupo de concreto, em especial com a avaliação estatística pertinente.

Conforme Zhang *et al.* (2018), a tensão de aderência na interface concreto/aço tende a diminuir conforme o aumento dos diâmetros dos vergalhões. Entretanto, alguns estudos trazem que o aumento do diâmetro fornece tensões maiores. É mister ressaltar que as barras analisadas, mesmo que de caráter nervurado, podem trazer diferentes conformações superficiais, o que denota automaticamente em distintas tensões de aderência na interface concreto/aço. Conforme evidenciado por Fusco (1995), outros parâmetros que interferem na interface é o grau de oxidação e o enferrujamento das barras. As barras de diâmetro 8

milímetros visivelmente apresentaram maior grau de oxidação, o que compactua com uma possível superfície de contato mais irregular e mais propensa para a formação das “engrenagens” mecânicas.

A zona de transição entre agregado e matriz é um fator fundamental na busca de interpretações corretas de elos fracos em concretos de cimento Portland e comportamentos específicos em concretos ativados alcalinamente. Uma zona de transição de alta porosidade e portanto fragilizada, nos concretos convencionais, a mesma zona nos concretos geopolímeros demonstra uma composição mais densa, embora em termos de microestrutura a maior parte da região aglutinante apresenta menor variação, comparada aos concretos CP. Uma zona de transição mais densa e menos porosa contribui para uma melhora nas propriedades mecânicas. Resistência à tração, tensão de aderência e durabilidade são algumas das propriedades que aumentam devido a uma melhor zona de transição (SINGH, *et al.*, 2015).

Apesar dos diâmetros apresentarem tensões de aderência distintas, verifica-se que os concretos CAA-2,0 e o referência CPV-ARI 0,55 apresentaram o maior grau de proximidade nas tensões, com o concreto alternativo atingindo maiores tensões em idades mais curtas e o concreto de cimento Portland atingindo maiores tensões aos 90 dias de idade. Procedendo com a avaliação da diferença significativa conforme os testes ANOVA e TUKEY tem-se:

Tabela 17 – Testes ANOVA e TUKEY, tensão de aderência, para as amostras CAA-1,6, CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55 (ϕ 5mm).

ANOVA (único fator) - 7 DIAS						
<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	15,380891	2	7,690446	21,620175	0,001809	5,143253
Dentro dos grupos	2,1342415	6	0,355707		HÁ DIFERENÇA SIGNIFICATIVA!!	
Total	17,515133	8				
TUKEY (único fator) - 7 DIAS						
<i>Amostra</i>	CAA-1,6		CAA-2,0		CPV 0,55	
CAA-1,6				0,0022		0,6951
CAA-2,0	8,61				0,0046	
CPV 0,55	1,19		7,424			
ϕ 5mm						
ANOVA (único fator) - 28 DIAS						
<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	11,652812	2	5,826405	7,280248	0,033035	5,786135
Dentro dos grupos	4,001516	5	0,800303		HÁ DIFERENÇA SIGNIFICATIVA!!	
Total	15,654327	7				
TUKEY (único fator) - 28 DIAS						
<i>Amostra</i>	CAA-1,6		CAA-2,0		CPV 0,55	
CAA-1,6				0,0279		0,3499
CAA-2,0	5,40				0,2402	
CPV 0,55	2,18		2,649			
ϕ 5mm						
ANOVA (único fator) - 90 DIAS						
<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	8,934627	2	4,467314	13,618336	0,005883	5,143252
Dentro dos grupos	1,968220	6	0,328037		HÁ DIFERENÇA SIGNIFICATIVA!!	
Total	10,90284706	8				
TUKEY (único fator) - 90 DIAS						
<i>Amostra</i>	CAA-1,6		CAA-2,0		CPV 0,55	
CAA-1,6				0,0564		0,1432
CAA-2,0	4,20				0,0048	
CPV 0,55	3,16		7,361			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 18 – Testes ANOVA e TUKEY, tensão de aderência, para as amostras CAA-1,6, CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55 (ϕ 8mm).

ANOVA (único fator) - 7 DIAS						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	26,453464	2	13,226732	10,59530	0,010745	5,143253
Dentro dos grupos	7,490151	6	1,248358		HÁ DIFERENÇA SIGNIFICATIVA!!	
Total	33,943614	8				
TUKEY (único fator) - 7 DIAS						
Amostra	CAA-1,6		CAA-2,0		CPV 0,55	
CAA-1,6				0,0090		0,2234
CAA-2,0		6,475				0,0797
CPV 0,55		2,663		3,812		
ϕ 8mm						
ANOVA (único fator) - 28 DIAS						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	26,620220	2	13,310110	3,826544	0,084871	5,143252
Dentro dos grupos	20,870180	6	3,478363		NÃO HÁ DIFERENÇAS SIGNIFICATIVAS!!	
Total	47,490400	8				
TUKEY (único fator) - 28 DIAS						
Amostra	CAA-1,6		CAA-2,0		CPV 0,55	
CAA-1,6				0,0759		0,2635
CAA-2,0		3,866				0,6128
CPV 0,55		2,475		1,391		
ϕ 8mm						
ANOVA (único fator) - 90 DIAS						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	57,746020	2	28,873010	57,359300	0,000123	5,143253
Dentro dos grupos	3,020226	6	0,503371		HÁ DIFERENÇA SIGNIFICATIVA!!	
Total	60,766246	8				
TUKEY (único fator) - 90 DIAS						
Amostra	CAA-1,6		CAA-2,0		CPV 0,55	
CAA-1,6				0,0004		0,0001
CAA-2,0		11,95				0,3567
CPV 0,55		14,07		2,117		

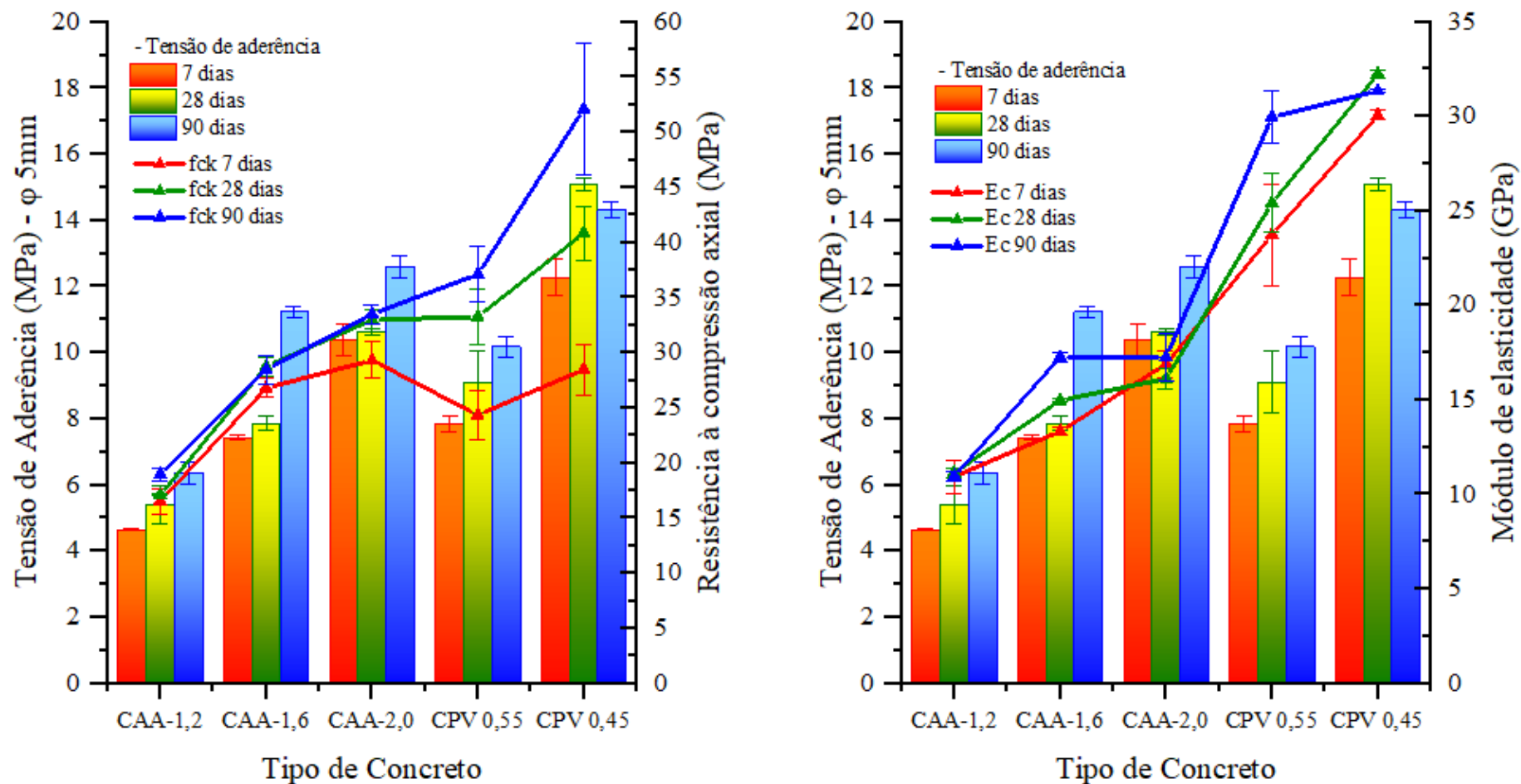
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A avaliação estatística da resistência à compressão destaca a proximidade que os concretos alternativos CAA-1,6 e CAA-2,0 forneceram com concreto de referência CPV-ARI 0,55. Além disso, as tipologias CAA-1,6 e CAA-2,0 não trouxeram variações em seus valores médios, em relação a algumas idades específicas (7 e 90 dias). Em 28 e 90 dias de idade, os concretos CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55 não indicaram variações significativas entre os valores médios, o que reforça o fato de que em 7 dias as amostras CAA atingem um pico mais alto de sua resistência à compressão limite, enquanto Os concretos convencionais têm um ganho mais gradativo na propriedade. No final, ambos os grupos podem ser atribuídos à mesma classe de resistência à compressão. Os concretos CAA-1,6 e CPV-ARI 0,551 foram agrupados entre si nas idades de 7 e 28 dias. Evidentemente, a amostra alternativa CAA-1,6 possui o parâmetro da relação molar inferior ao CAA-2,0, o que pode explicar a ausência de ganho aos 90 dias de idade (CAA-1,6 e CPV-ARI 0,55 apresentaram variações significativas nessa idade).

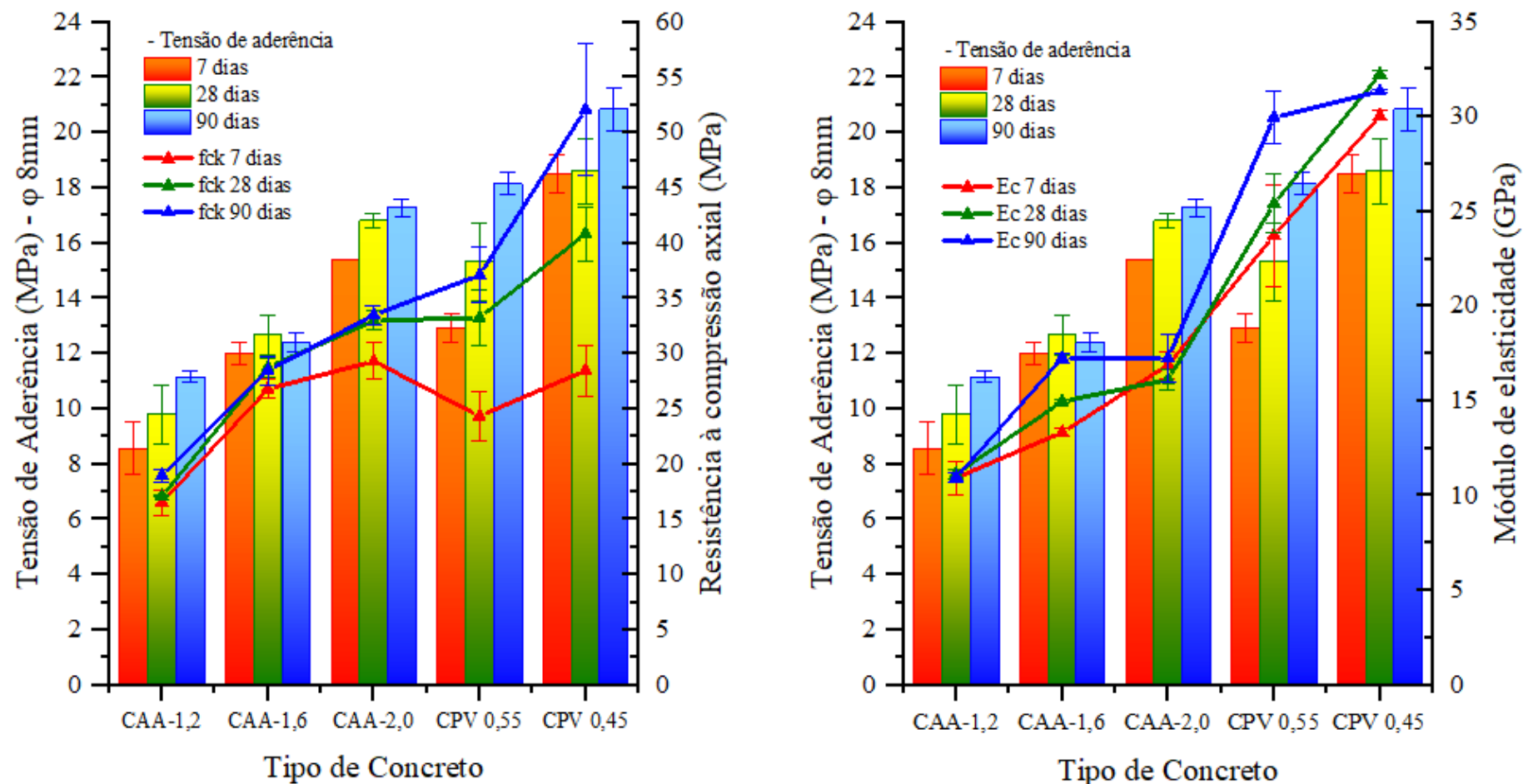
A resistência à tração por compressão diametral mostrou a mesma perspectiva da resistência à compressão axial para os grupos CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55. Não obstante, os concretos CAA-1,6 e CAA-2,0 apresentaram seus valores médios sem variações significativas para idades de 28 e 90 dias. As análises estatísticas na resistência de união fornecem uma característica notável em relação às amostras CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55. Apresentam de fato a mesma resistência de união em todas as três idades para vergalhões de diâmetro de 8 milímetros e com exceção de 7 e 90 dias para vergalhões de diâmetro de 5 milímetros, os valores das amostras conduzem aos mesmos valores médios para força de adesão. Portanto, o concreto alternativo CAA-2,0 pode ser colocado na mesma classe de comportamento de ligação com um concreto de cimento Portland CPV-ARI e proporção em massas de água / aglomerante de 0,55. Ainda assim, o CAA-1,6 é muito relacionado aos outros grupos, especialmente para 5 milímetros de diâmetro de vergalhão e idades iniciais para 8 milímetros. Outras semelhanças entre o CAA-1,6 e o CAA-2,0 foram também identificadas nas propriedades mecânicas anteriores.

As figuras 64 e 65 ilustram a tensão de aderência média identificada na tabela 16 com as propriedades mecânicas encontradas de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade.

Figura 64 – Comparativo resistência à compressão, módulo e tensão de aderência ($\phi 5\text{mm}$).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 65 – Comparativo resistência à compressão, módulo e tensão de aderência ($\phi 8\text{mm}$).

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As curvas características da resistência à compressão axial e do módulo de elasticidade se replicam nas figuras 64 e 65, uma vez que as cinco amostras de concreto foram aplicadas para ambos os vergalhões de 5 e 8 milímetros. Observa-se com relação aos concretos alternativos (CAA) que a tensão de aderência aumenta conforme o aumento da relação molar ξ ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$), conforme a legenda representativa das tipologias de concreto. Essa distribuição crescente também é evidenciada nas demais propriedades mecânicas representadas nas figuras 5.24 e 5.25. A resistência é maior quando a relação molar é também maior, fato este também observado no módulo, com exceção de uma significativa semelhança nessa última propriedade nos concretos CAA-1,6 e CAA-2,0 aos 90 dias de idade (nota-se a constância na curva azul – E_c aos 90 dias de idade). As curvas dos módulos de elasticidade denotam que os concretos referência contêm maiores valores da propriedade, e dessa forma, o crescimento do módulo conforme a transição dos grupos (CAA-1,2 ao CPV-ARI 0,45) é evidente.

A curva em vermelho representando o f_{cm} aos 7 dias demonstra uma não linearidade conforme os valores das amostras CAA-1,2 até CPV-ARI 0,45. Os concretos convencionais adquirem resistências altas em idades curtas, entretanto, seu ganho em idades mais avançadas é maior, o que justifica esse crescimento não linear na curva. Aos 28 dias os concretos CAA-1,6, CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55 possuem médias de resistência próximas. Um crescimento linear é observado com maior clareza na curva do f_{cm} aos 90 dias, na qual o concreto CPV-ARI 0,55 ganhou mais resistência de modo a superar as médias encontradas para os concretos CAA-1,6 e CAA-2,0.

Em especial para as barras de diâmetro inferior (5mm), a tensão de aderência média dos concretos com $\xi = 1,6$ e $\xi = 2,0$ é maior que a do concreto CPV-ARI 0,55 na idade última de 90 dias. Para o diâmetro de 8 milímetros, a tensão de aderência média do concreto CAA-2,0 é muito próxima ao CPV-ARI 0,55, entretanto, não se observa a mesma proximidade entre os concretos CAA-1,6 e CAA-2,0. O vergalhão de 5 milímetros evidenciou tensões de aderência média similares para os concretos CAA-1,6 e CAA-2,0. É mister ressaltar que o ganho na transição entre as idades de 28 e 90 dias foi maior para o concreto alternativo com relação molar $\xi = 1,6$.

Em suma, os concretos analisados têm e propensão em serem utilizados em diversas aplicações. Conforme Un *et al.* (2015), Mathew *et al.* (2018) e Zhang *et al.* (2017), os concretos de ativação alcalina podem ser aplicados inclusive em peças estruturais, fornecendo propriedades semelhantes às encontradas nos concretos convencionais.

5 CONCLUSÕES

Os resultados encontrados fornecem um fechamento daquilo que foi constatado ao longo do trabalho e algumas análises subsequentes para projetos futuros podem ser propostas.

5.1 CONCLUSÕES DO TRABALHO

Em termos da fabricação dos concretos ativados alcalinamente, o seu procedimento de dosagem foi contemplado com eficácia e foi possível perceber os distintos condicionantes dos materiais que interferem nas propriedades mecânicas propriamente ditas. O metacaulim se mostrou como um aglomerante plausível para os compostos geopoliméricos, e a utilização de um ativador alternativo também se mostrou conveniente em termos dos resultados atingidos. Por meio da fabricação de concretos que não necessitem do cimento Portland, automaticamente a sustentabilidade entre no escalonamento final dos processos. Contudo, se tratando dos compostos ativados alcalinamente, os ativadores convencionais desempenham função intransponível porém a eles se é atribuída uma carga danosa ao meio ambiente. Então, a utilização de um material alternativo, no caso a cinzada casca de arroz combinada com o hidróxido de sódio, é de extrema importância vide a análise quanto a sustentabilidade global dos processos.

Em relação às diferentes tipologias de CAA trabalhadas, houve um alcance das melhores propriedades na amostra CAA-2,0, a qual, em termos de dosagem, possui seu ativador mais atuante em termos do quantitativo de silício e consequente fator de polimerização. Porém, é mister ressaltar que o grupo CAA-1,6 forneceu resultados pertinentes, especial para a resistência à compressão e as curvas de arrancamento, resultados estes que foram similares ao referência CPV-ARI 0,55, nas mesmas idades de análise, com a comprovação dos teste estatísticos.

Na busca pelo f_{cm28} de 30 MPa nos concretos ativados alcalinamente, o CAA-2,0 trouxe a propriedade almejada, já para idades mais curtas. De certa forma, os concretos alternativos apresentaram a propriedade mecânica de resistência à compressão axial de forma muito conveniente, uma vez que a faixa de 25 a 30 MPa foi evidenciada, aos sete dias de

idade, para as amostras CAA-1,6 e CAA-2,0, com manutenção da faixa até os 90 dias de idade. Concomitantemente, o módulo de elasticidade foi exposto na faixa dos 17 MPa, aos 90 dias de idade. Ganhos mais expressivos foram observados no módulo de elasticidade, em especial no intervalo das idades de 7 aos 90 dias. De maneira geral essa propriedade mecânica foi significativamente inferior se comparada aos concretos de cimento Portland. Entretanto, a bibliografia reforça o fato de que em inúmeras pesquisas o módulo de elasticidade foi inferior nos concretos geopoliméricos, apesar da identificação de uma mesma classe de resistência comparando com um concreto convencional.

Em termos de aderência, as amostras de CAA apresentaram comportamento (formato da curva de arrancamento) semelhante entre elas, com ápice de desempenho para o CAA-2,0. As curvas de aderência para os concretos alternativos foram evidenciadas num patamar similar ao concreto referência. É evidente que as particularidades ocorreram entre os dois grandes grupos, contudo, a descrição das curvas é similar. A análise estatística comprova que há, em concomitância, viabilidade no concreto CAA-1,6, principalmente no que faz referência ao diâmetro de 5 milímetros. Ambos os grupos CAA-1,6 e CPV-ARI-0,55 trouxeram tensões de aderência sem grandes variações significativas em suas médias. O concreto CAA-2,0 apresentou tensões de aderência nas três idades analisadas livres de variações com relação ao concreto CPV-ARI-0,55, para o diâmetro de 8 milímetros. Portanto, além do formato das curvas estarem em concordância (referência e alternativo), as tensões de aderência identificadas também se apresentaram em patamares iguais.

Em suma, os concretos CAA demonstraram alta pertinência. O aglomerante utilizado (metacaulim) já havia sido solidificado no meio científico, para a aplicação específica nos compostos geopoliméricos, apenas sendo reforçado pelos resultados atingidos como um componente altamente aplicável. Em acréscimo, um dos objetivos primordiais estabelecidos no trabalho, sendo a completa exclusão do silicato de sódio no ativador dos concretos, também foi atingido, uma vez que não só os resultados das propriedades mecânicas foram apropriados, mas também a questão do reaproveitamento de um resíduo (cinza da casca de arroz) também foi contemplado. Logo, os concretos ativados alcalinamente cujo aglomerante seja 100% o metacaulim e cujo ativador seja a CCA combinada ao hidróxido de sódio são uma grande promessa para futuras pesquisas no ramo da construção civil.

5.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Dadas as propriedades identificadas nos concretos ativados alcalinamente, essas propostas de concretos alternativos podem ser investigadas em possíveis novas linhas de trabalho. Uma vez que o grupo CAA-1,2 demonstrou os menores resultados em termos das propriedades mecânicas avaliadas, a relação molar $\xi = 1,2$ não é ideal para o tipo de concreto que foi construído, além dos valores da relação abaixo de 1,2 serem, por consequência, inviáveis na tentativa de alcance das melhores amostras alternativas.

No que diz respeito aos valores da relação molar ξ superiores a 1,2, os resultados demonstram clara viabilidade. Entretanto, uma das linhas que podem ser adotadas é a investigação do limite na eficiência da relação molar, de maneira que as relações 2,4 em diante possam ser analisadas, até o alcance de um patamar na eficiência da CCA na pré-ativação alcalina.

Com relação aos concretos alternativos estudados, uma maior ênfase, por exemplo no concreto CAA-2,0 pode ser conduzida, em especial para o fortalecimento nos resultados dessa tipologia de concreto, além do teste de aderência com outros diâmetros de barras de aço. Investigações de caráter mais microestrutural dos concretos também podem ser conduzidas, a exemplo de uma possível análise na zona de transição entre o agregado e a matriz. Um aprofundamento da porosidade desses concretos alternativos também é de muita valia, uma vez que tal característica sustenta o que é evidenciado em termos de propriedades mecânicas.

Num cenário mais geral dos ensaios de arrancamento, outros ensaios podem ser procedidos para a análise da tensão de aderência, servindo portanto de comparativo com o que foi evidenciado com o pull-out, a exemplo do beam test e do push-out test.

REFERÊNCIAS

AL-AZZAWI, M.; YU, T.; HADI, M. N. S. Factors affecting the bond strength between the fly ash-based geopolymer concrete and steel reinforcement. **Structures**, Oxford, v. 14, p. 262-272, 2018.

ALBITAR, M.; ALI MOHAMED, M. S.; VISINTIN, P.; DRECHSLER, M. Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 136, p. 374-385, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12655**: concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação. Rio de Janeiro, 2015. 23 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5739**: concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto — procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7222**: concreto e argamassa — determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 1 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7477**: determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1982. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7480**: aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - especificação. Rio de Janeiro, 2007. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8522**: concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017. 20 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8953**: concretos para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2018. 1 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBRNM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBRNM 30**: agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBRNM 45**: agregados - determinação da massa unitária, massa unitária compactada e seca e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBRNM 46**: agregados - determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBRNM 52**: agregado miúdo – determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBRNM 53**: agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 23**: cimento portland e outros materiais em pó – determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 65**: cimento portland – determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 67**: concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 76**: cimento portland – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de blaine). Rio de Janeiro, 1998. 12 p.

AVILA, C. A. **Estudo da utilização da mistura de cinza da casca de arroz com hidróxido de sódio na produção de argamassas ativadas alcalinamente**. 2018. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2018. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/180872/avila_tc_me_ilha.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: 12 abr. 2019.

BARBOSA, M. T. G. **Avaliação do comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência**. 2002. 203 f. Tese (Doutorado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

BARKER, D. J.; TURNER, S. A.; NAPIER-MOORE, M.; CLARK, M.; DAVISON, J. E. CO₂ capture in the cement industry. **Energy Procedia**, Amsterdam, v. 1, p. 87-94, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.014>.

BASRI MOHD, S. M.; MASLAN, N.; MUSTAPHA, F.; ISHAK RIDZWAN, M. Correlation between compressive strength and fire resistant performance of rice husk ash-based geopolymer binder for panel applications. **MATEC Web of Conferences** 97, 2017. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701025>. Disponível em: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/11/mateconf_eti2017_01025.pdf. Acesso em: 12 abr. 2019.

BILLONG, N.; KINUTHIA, J.; OTI, J.; MELO, U. C. Performance of sodium silicate free geopolymers from metakaolin (MK) and rice husk ash (RHA): effect on tensile strength and microstructure. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 189, p. 203-210, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.001>.

BOUZÓN, N.; PAYÁ, J. M.; BORRACHERO, L. S.; TASHIMA, M. M.; MONZÓ, J. Refluxed rice husk ash/NaOH suspension for preparing alkali activated binders. **Materials Letters**, Amsterdam, v. 115, p. 72-74, Jan. 2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2013.10.001>.

CAI, B.; WANG, J.; HE, J.; GENG, Y. Evaluating CO₂ emission performance in China's cement industry: an enterprise perspective. **Applied Energy**, Kidlington, v. 166, p. 191-200, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.006>.

CAMACHO, J. S. **Curso de concreto armado**: detalhamento das armaduras de flexão. Ilha Solteira: FEIS/UNESP, 2014. 23 p.

CARVALHO, E. P.; MIRANDA, M. P.; FERNANDES, D. S. G.; ALVES, G. V. Comparison of test methodologies to evaluate steel-concrete bond strength of thin reinforcing bar. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 183, p. 243-252, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.109>.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2003. 3. ed. São Carlos: Ed. da UFSCar, 2007. 386 p.

CASTRO, C. M. **Concreto de alto desempenho: estudo da aderência com a armadura sob ações repetidas**. 2002. 223 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Bond action and bond behaviour of reinforcement**, Paris, 1982. Bulletin d'information, 151.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON - CEB – **FIP model code 1990**. Paris, 1991. Bulletin d'information, 204, 1991.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, **Reinforcement, bond and anchorage**, Bulletin d'information, 118, Paris, 1979.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **RILEM/CEB/FIB RC 5: bond test reinforcement steel - BEAM TEST**. Concrete Reinforcement Technology, Georgi Publishing Company, Paris, 1983.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **RILEM/CEB/FIB RC6: bond test for reinforcement steel - 2 Pull-out test**. Concrete Reinforcement Technology, Georgi Publishing Company, Paris, 1983.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer chemistry and applications**. 2. ed. Saint-Quentin: Publ. Morrisville, 2008. 570 p.

DUCATTI, V. A. **Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura**. 1993. São Paulo. 273 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

FAN, F.; LIU, Z.; XU, G.; PENG, H.; CAI, C. S. Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 160, p. 66-81, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.023>.

FRANÇA, V. H. **Aderência aço-concreto: uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. 2004. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91477/franca_vh_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 16 abr. 2019.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1995.

GAO, T.; SHEN, L.; SHEN, M.; CHEN, F.; LIU, L.; GAO, L. Analysis on differences of carbon dioxide emission from cement production and their major determinants. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 103, p. 160-170, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.026>.

GAO, T.; SHEN, L.; SHEN, M.; LIU, L.; CHEN, F.; GAO, L. Evolution and projection of CO₂ emissions for China's industry from 1980 to 2020. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 75, p. 522-537, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.006>.

GLUKHOVSKY, V. D.; ROSTOVSKAJA, G. S.; RUMYNA, G. V. High strength slag-alkaline cements. In: INTERNATIONAL CONGRESS CHEMICAL CEMENT, 7, 1980, Paris. **Congress of the [...]**. Paris: [s.n.], 1980. V. 3, p. 164 – 168.

- GUADES, J. E. Experimental investigation of the compressive and tensile strengths of geopolymer mortar: the effect of sand/fly ash (S/FA) ratio. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 127, p. 484-493, 2016. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.030>.
- HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1993. 349 p.
- HUSEIEN, G. F.; MIRZA, J.; ISMAIL, M.; GHOSHAL, S. K.; HUSSEIN, A. A. Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 80, p. 54-74, 2017. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.076>.
- KAMSEU, E.; BELEUK À MOUNGAM, L. M.; CANNIO, M.; BILLONG, N.; CHAYSIWAN, D.; CHINJE MELO, U.; LEONELLI, C. Substitution of sodium silicate with rice husk ash-NaOH solution in metakaolin based geopolymer cement concerning reduction in global warming. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 142, p. 3050-3060, 2017. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.164>.
- KAUR, K.; SINGH, J.; KAUR, M. Compressive strength of rice husk ash based geopolymer: The effect of alkaline activator. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 169, p. 188-192, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.200>.
- KHALE, D.; CHAUDHARY, R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of Materials Science**, New York, v. 42, p. 729-746, 2007. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-006-0401-4>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- KONG, D. L. Y.; SANJAYAN, J. G.; SAGOE-CRENTSIL, K. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 37, p. 1583-1589, 2007. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.021>.
- LANCELLOTTI, I.; CATAURO, M.; PONZONI, C.; BOLLINO, F.; LEONELLI, C. Inorganic polymers from alkali activation of metakaolin: Effect of setting and curing on structure. **Journal of Solid State Chemistry**, Maryland Heights, v. 200, p. 341-348, 2013. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssc.2013.02.003>.
- LIU, Z.; CAI, C. S.; LIU, F.; FAN, F. Feasibility study of loess stabilization with fly ash-based geopolymer. **Journal Materials in Civil Engineering**, Reston, v. 28, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001490.
- MATHEW, G.; JOSEPH, B. Flexural behaviour of geopolymer concrete beams exposed to elevated temperatures. **Journal of Building Engineering**, Oxford, v. 15, p. 311-317, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.09.009>.
- METHA, A.; SIDDIQUE, R. Sustainable geopolymer concrete using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash: strength and permeability properties. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 2, n. 05, p. 49-57, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.313>.

- METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.
- MO, K. H.; JOHNSON ALENGARAM, U.; ZAMIN JUMAAT, M. Structural performance of reinforced geopolymer concrete members: A review. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 120, p. 251-264, 2016. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.088>.
- MUDULI, R.; MUKHARJEE, B. B. Effect of incorporation of metakaolin and recycled coarse aggregate on properties of concrete. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 209, p. 398-414, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.221>.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- NUAKLONG, P.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 161, p. 365-373, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.152>.
- PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J. A.; LEONELLI, C.; PALOMO, A.; CHINDAPRASIRT, P. **Handbook of alkaliactivated cements, mortars and concretes**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. 812 p. (Series in Civil and Structural Engineering, 54).
- PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? **Materials and Structures**, Dordrecht, v. 47, p. 11–25, 2014.
- PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (eds.). **Geopolymers**: structures, processing, properties and industrial applications. Boca Raton: CRC, 2009. Disponível em: https://www.academia.edu/34232666/Geopolymers_Structures_Processing_Properties_and_Industrial_Applications. Acesso em: 15 abr. 2019.
- RAKHIMOVA, N. R.; RAKHIMOV, R. Z. Reaction products, structure and properties of alkali-activated metakaolin cements incorporated with supplementary materials – a review. **Journal of Materials Research and Technology**, Rio de Janeiro, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.006>. Disponível em: <http://www.jmrt.com.br/en-reaction-products-structure-properties-alkali-activated-articulo-S2238785418302229>. Acesso em: 16 abr. 2019.
- RAMUJEE, K.; POTHARAJU, M. Mechanical properties of geopolymer concrete composites. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 4, n. 2, p. 2937-2945, 2017.
- RASHIDIAN-DEZFOULI, H.; RANGARAJU, P. R.; KOTHALA, V. S. K. Influence of selected parameters on compressive strength of geopolymer produced from ground glass fiber. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 162, p. 393-405, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.166>.

- RYU, S. G.; LEE, Y. B.; KOH, K. T; CHUNG, Y. S. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 47, p. 409-418, 2013. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.069>
- SHEN, L.; GAO, T.; ZHAO, J.; WANG, L.; LAN, W.; LIU, L.; CHEN, F.; XUE, J. Factory-level measurement on CO₂ emission factors of cement production in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 34, p. 337-349, 2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.025>.
- SHI, C.; FERNÁNDEZ JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 41, p. 750-763, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>.
- SHI, C.; KRIVENKO, P. V; ROY, D. **Alkali-activated cements and concretes**. New York: CCR Press, 2006. 388 p.
- SINGH, B.; ISHWARYA, G.; GUPTA, M.; BHATTACHARYYA, S. K. Geopolymer concrete: a review of some recent developments. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 85, p. 78-90, 2015. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>.
- TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. 2006. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91490/tashima_mm_me_ilha_prot.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 16 abr. 2019.
- UN, C. H.; SANJAYAN, J. G.; SAN NICOLAS, R.; VAN DEVENTER, J. S. J. Predictions of long-term deflection of geopolymer concrete beams. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 94, p. 10-19, 2015. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.030>.
- ZHANG, C.; HAN, R.; YU, B.; WEI, Y. Accounting process-related CO₂ emissions from global cement production under Shared Socioeconomic Pathways. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 184, p. 451-465, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.043>.
- ZHANG, H.Y.; KODUR, V.; QI, S.L.; CHAO, L.; WU, B. Development of metakaolin–fly ash based geopolymers for fire resistance applications. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 55, p. 38-45, 2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.040>.
- ZHANG, H. Y.; KODUR, V.; WU, B.; YAN, J.; YUAN, Z. S. Effect of temperature on bond characteristics of geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 163, p. 277-285, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.043>.

ZHANG, Z. J.; ZHANG, H. Y.; ZHENG, J. H.; LIN, K. H.; SU, Y. Axial compression behavior of reinforced geopolymer concrete columns with demolished concrete lumps. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 210, p. 203-210, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.067>.

ZOU, Y.; YANG, T. Rice husk, rice husk ash and their applications. In: CHEONG, L. Z. ; XU, X. **Rice bran and rice bran oil**. Champaign: AOCS Press, 2019. Cap. 9, p. 207-246, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812828-2.00009-3>.

APÊNDICE A – FORÇAS MÉDIAS DE ARRANCAMENTO EM RELAÇÃO AO DESLOCAMENTO SOFRIDO PELAS BARRAS DE AÇOS DE 5 E 8mm – ENSAIOS AOS 7 DIAS.

ϕ 5mm	FORÇA MÉDIA (kN) - 7 DIAS DE IDADE					ϕ 8mm	FORÇA MÉDIA (kN) - 7 DIAS DE IDADE				
Esc (mm)	CAA -1,2	CAA -1,6	CAA -2,0	CPV 0,45	CPV 0,55	Esc (mm)	CAA -1,2	CAA -1,6	CAA -2,0	CPV 0,45	CPV 0,55
0,00	-	-	-	-	-	0,00	-	-	-	-	-
0,10	2,66	3,00	5,11	-	3,83	0,10	7,29	11,36	#N/D	14,48	11,83
0,20	3,15	4,46	6,32	6,12	4,74	0,20	9,12	13,52	13,67	19,18	14,50
0,30	3,49	4,92	7,18	7,18	5,40	0,30	10,26	14,97	16,18	22,11	16,29
0,40	3,69	5,26	7,86	8,08	5,90	0,40	11,02	16,12	18,03	23,95	17,53
0,50	3,86	5,56	8,47	8,85	6,32	0,50	11,51	16,86	19,62	25,01	18,33
0,60	4,00	5,81	8,98	9,41	6,63	0,60	11,91	17,33	20,97	25,66	18,83
0,70	4,12	6,05	9,42	9,91	6,89	0,70	12,21	17,62	22,03	26,11	19,15
0,80	4,23	6,27	9,73	10,32	7,10	0,80	12,46	17,80	22,73	26,38	19,35
0,90	4,30	6,47	9,93	10,60	7,21	0,90	12,61	17,95	23,19	26,54	19,44
1,00	4,35	6,64	10,08	10,78	7,30	1,00	12,72	18,05	23,44	26,66	19,48
1,10	4,37	6,78	10,18	10,88	7,35	1,10	12,81	18,09	23,60	26,71	19,46
1,20	4,38	6,87	10,22	10,92	7,36	1,20	12,88	18,08	23,67	26,69	19,39
1,30	4,38	6,95	10,20	10,94	7,35	1,30	12,91	18,05	23,73	26,61	19,32
1,40	4,35	6,99	10,14	10,86	7,30	1,40	12,89	18,01	23,73	26,49	19,19
1,50	4,33	7,00	10,07	10,79	7,22	1,50	12,85	17,91	23,73	26,34	19,05
1,60	4,29	6,99	9,93	10,68	7,15	1,60	12,80	17,83	23,68	26,21	18,94
1,70	4,25	6,94	9,80	10,52	7,03	1,70	12,75	17,76	23,63	25,94	18,81
1,80	4,20	6,87	9,68	10,29	6,90	1,80	12,66	17,64	23,59	25,64	18,69
1,90	4,13	6,79	9,49	10,00	6,74	1,90	12,52	17,54	23,54	25,44	18,52
2,00	4,05	6,70	9,26	9,76	6,58	2,00	12,38	17,40	23,48	25,02	18,32
2,10	3,96	6,61	9,10	9,44	6,42	2,10	12,20	17,30	23,39	24,81	18,12
2,20	3,88	6,48	8,91	9,19	6,22	2,20	11,99	17,15	23,30	24,40	17,96
2,30	3,77	6,36	8,71	8,97	6,02	2,30	11,78	17,01	23,22	24,09	17,79
2,40	3,69	6,23	8,50	8,57	5,85	2,40	11,59	16,88	23,10	23,88	17,51
2,50	3,58	6,11	8,32	8,29	5,64	2,50	11,37	16,66	22,97	23,52	17,28
2,60	3,48	5,98	8,12	7,94	5,45	2,60	11,15	16,47	22,83	23,21	17,03
2,70	3,36	5,84	7,86	7,67	5,26	2,70	10,94	16,27	22,77	22,89	16,74
2,80	3,27	5,68	7,55	7,38	5,00	2,80	10,75	16,08	22,62	22,34	16,50
2,90	3,17	5,54	7,38	7,08	4,74	2,90	10,49	15,82	22,55	22,12	16,25
3,00	3,07	5,39	7,17	6,77	4,58	3,00	10,31	15,63	22,41	21,79	16,04
3,10	2,96	5,23	7,01	6,56	4,36	3,10	10,09	15,50	22,28	21,57	15,70
3,20	2,88	5,12	6,78	6,18	4,13	3,20	9,91	15,23	22,12	21,10	15,51
3,30	2,81	4,98	6,60	5,94	3,91	3,30	9,68	14,95	21,97	20,88	15,30
3,40	2,74	4,85	6,42	5,51	3,68	3,40	9,50	14,76	21,90	20,47	15,01
3,50	2,65	4,72	6,28	5,30	3,47	3,50	9,28	14,49	21,74	20,01	14,80

3,60	2,58	4,57	6,09	4,95	3,28	3,60	9,12	14,15	21,65	19,66	14,42
3,70	2,53	4,49	5,96	4,79	3,09	3,70	9,00	13,93	21,48	19,41	14,16
3,80	2,48	4,38	5,86	4,64	2,89	3,80	8,85	13,67	21,22	18,93	13,83
3,90	2,44	4,30	5,78	4,57	2,76	3,90	8,67	13,47	21,02	18,57	13,55
4,00	2,41	4,25	5,74	4,59	2,61	4,00	8,56	13,21	20,85	18,14	13,29
4,10	2,39	4,19	5,73	4,67	2,52	4,10	8,44	13,00	20,67	17,65	12,93
4,20	2,38	4,17	5,75	4,80	2,45	4,20	8,35	12,79	20,50	17,09	12,72
4,30	2,39	4,15	5,79	4,95	2,42	4,30	8,27	12,46	20,22	16,68	12,35
4,40	2,40	4,15	5,84	5,12	2,42	4,40	8,22	12,32	20,03	16,27	12,03
4,50	2,42	4,17	5,94	5,31	2,44	4,50	8,18	12,12	19,83	15,96	11,74
4,60	2,44	4,18	6,01	5,52	2,54	4,60	8,15	11,93	19,64	15,70	11,48
4,70	2,49	4,21	6,08	5,65	2,62	4,70	8,14	11,67	19,54	15,47	11,21
4,80	2,52	4,24	6,14	5,78	2,72	4,80	8,15	11,56	19,26	15,41	10,95
4,90	2,54	4,27	6,20	5,94	2,86	4,90	8,19	11,39	18,90	15,21	10,76
5,00	2,57	4,31	6,27	6,05	2,96	5,00	8,22	11,25	18,80	15,15	10,56
5,10	2,60	4,34	6,32	6,15	3,04	5,10	8,24	11,16	18,53	15,03	10,33
5,20	2,62	4,37	6,36	6,21	3,16	5,20	8,30	11,05	18,35	15,01	10,12
5,30	2,64	4,39	6,39	6,28	3,26	5,30	8,36	11,00	18,07	15,02	9,88
5,40	2,66	4,40	6,41	6,29	3,35	5,40	8,42	10,99	17,78	15,06	9,74
5,50	2,67	4,40	6,43	6,27	3,41	5,50	8,46	10,97	17,49	15,08	9,55
5,60	2,67	4,41	6,43	6,25	3,46	5,60	8,51	10,93	17,30	15,09	9,44
5,70	2,68	4,42	6,42	6,18	3,52	5,70	8,55	10,92	17,12	15,18	9,28
5,80	2,69	4,41	6,40	6,12	3,56	5,80	8,61	10,90	16,84	15,27	9,12
5,90	2,70	4,41	6,37	6,10	3,57	5,90	8,62	10,89	16,66	15,36	9,01
6,00	2,69	4,40	6,34	6,02	3,56	6,00	8,61	10,89	16,41	15,43	8,93
6,10	2,69	4,39	6,31	5,99	3,56	6,10	8,62	10,89	16,24	15,51	8,79
6,20	2,69	4,38	6,28	5,90	3,53	6,20	8,62	10,88	16,01	15,54	8,75
6,30	2,68	4,35	6,25	5,78	3,49	6,30	8,58	10,88	15,87	15,58	8,67
6,40	2,67	4,33	6,19	5,67	3,44	6,40	8,56	10,88	15,59	15,61	8,62
6,50	2,65	4,30	6,14	5,54	3,38	6,50	8,53	10,87	15,45	15,61	8,56
6,60	2,63	4,28	6,10	5,42	3,35	6,60	8,50	10,85	15,24	15,60	8,55
6,70	2,60	4,26	6,05	5,34	3,28	6,70	8,45	10,84	15,21	15,56	8,55
6,80	2,58	4,23	6,02	5,17	3,21	6,80	8,37	10,82	15,12	15,57	8,56
6,90	2,55	4,21	5,96	5,09	3,15	6,90	8,34	10,82	14,91	15,44	8,57
7,00	2,49	4,17	5,91	4,96	3,09	7,00	8,29	10,77	14,83	15,37	8,59
7,10	2,46	4,15	5,88	4,83	3,01	7,10	8,26	10,76	14,76	15,36	8,65
7,20	2,41	4,11	5,85	4,66	2,93	7,20	8,18	10,66	14,61	15,27	8,69
7,30	2,38	4,08	5,81	4,53	2,87	7,30	8,11	10,63	14,59	15,16	8,71
7,40	2,33	4,05	5,78	4,44	2,80	7,40	8,04	10,54	14,61	15,06	8,76
7,50	2,31	4,02	5,74	4,33	2,74	7,50	7,99	10,48	14,52	15,04	8,80
7,60	2,29	3,98	5,70	4,23	2,65	7,60	7,92	10,45	14,43	14,90	8,83
7,70	2,26	3,96	5,69	4,19	2,56	7,70	7,87	10,34	14,40	14,76	8,85
7,80	2,26	3,94	5,66	4,13	2,50	7,80	7,80	10,25	14,38	14,64	8,88
7,90	2,25	3,91	5,64	4,13	2,42	7,90	7,71	10,21	14,40	14,50	8,90
8,00	2,24	3,89	5,62	4,10	2,38	8,00	7,68	10,06	14,39	14,35	8,94
8,10	2,24	3,87	5,61	4,11	2,33	8,10	7,63	9,97	14,37	14,35	8,94

8,20	2,24	3,85	5,60	4,17	2,29	8,20	7,59	9,88	14,38	14,28	8,95
8,30	2,24	3,84	5,58	4,24	2,26	8,30	7,57	9,80	14,39	14,11	8,94
8,40	2,26	3,84	5,57	4,30	2,26	8,40	7,53	9,70	14,41	13,94	8,93
8,50	2,25	3,83	5,55	4,36	2,27	8,50	7,51	9,62	14,43	13,77	8,92
8,60	2,27	3,82	5,53	4,42	2,29	8,60	7,52	9,52	14,43	13,61	8,88
8,70	2,27	3,82	5,53	4,52	2,33	8,70	7,51	9,43	14,43	13,56	8,86
8,80	2,29	3,83	5,52	4,62	2,36	8,80	7,52	9,37	14,42	13,43	8,84
8,90	2,29	3,83	5,52	4,67	2,43	8,90	7,55	9,28	14,41	13,35	8,80
9,00	2,30	3,84	5,51	4,73	2,51	9,00	7,58	9,20	14,41	13,26	8,78
9,10	2,31	3,85	5,51	4,81	2,57	9,10	7,62	9,15	14,38	13,16	8,75
9,20	2,33	3,84	5,50	4,88	2,64	9,20	7,66	9,12	14,39	13,10	8,71
9,30	2,35	3,84	5,50	4,92	2,74	9,30	7,71	9,09	14,42	13,03	8,70
9,40	2,35	3,85	5,47	4,95	2,82	9,40	7,75	9,06	14,42	12,94	8,64
9,50	2,36	3,84	5,45	4,98	2,92	9,50	7,77	9,03	14,37	12,89	8,57
9,60	2,37	3,84	5,42	4,98	2,98	9,60	7,83	9,00	14,34	12,85	8,49
9,70	2,37	3,83	5,40	4,97	3,03	9,70	7,85	8,97	14,34	12,84	8,43
9,80	2,37	3,81	5,38	4,94	3,11	9,80	7,89	8,96	14,29	12,84	8,33
9,90	2,36	3,79	5,36	4,89	3,13	9,90	7,94	8,95	14,24	12,85	8,26
10,00	2,36	3,78	5,34	4,87	3,18	10,00	7,96	8,94	14,17	12,87	8,20
10,10	2,35	3,76	5,32	4,82	3,19	10,10	7,97	8,96	14,16	12,91	8,12
10,20	2,35	3,74	5,29	4,78	3,19	10,20	7,99	8,97	14,09	12,93	8,03
10,30	2,34	3,73	5,26	4,76	3,18	10,30	7,99	8,98	14,00	12,96	7,92
10,40	2,34	3,70	5,25	4,71	3,18	10,40	7,99	8,97	13,90	12,99	7,82
10,50	2,33	3,70	5,22	4,65	3,16	10,50	7,99	8,98	13,80	13,01	7,72
10,60	2,32	3,68	5,20	4,63	3,13	10,60	7,98	9,00	13,72	13,04	7,64
10,70	2,32	3,67	5,18	4,55	3,10	10,70	7,96	9,01	13,62	13,07	7,63
10,80	2,31	3,65	5,15	4,53	3,06	10,80	7,92	9,01	13,52	13,10	7,53
10,90	2,30	3,62	5,13	4,48	3,03	10,90	7,88	9,02	13,37	13,12	7,49
11,00	2,28	3,60	5,11	4,45	2,99	11,00	7,81	9,01	13,37	13,15	7,41
11,10	2,28	3,58	5,08	4,37	2,95	11,10	7,78	9,01	13,28	13,17	7,33
11,20	2,26	3,56	5,06	4,29	2,90	11,20	7,73	9,01	13,05	13,16	7,25
11,30	2,25	3,54	5,04	4,23	2,86	11,30	7,67	8,99	12,93	13,13	7,19
11,40	2,24	3,52	5,01	4,16	2,81	11,40	7,62	8,98	12,79	13,14	7,14
11,50	2,23	3,50	4,99	4,10	2,77	11,50	7,58	8,95	12,73	13,12	7,10
11,60	2,22	3,48	4,97	4,04	2,71	11,60	7,52	8,91	12,67	13,07	7,08
11,70	2,21	3,47	4,95	3,99	2,68	11,70	7,48	8,87	12,48	13,04	7,03
11,80	2,20	3,44	4,94	3,95	2,62	11,80	7,49	8,85	12,44	13,06	7,00
11,90	2,20	3,41	4,90	3,93	2,58	11,90	7,47	8,80	12,34	13,05	6,99
12,00	2,18	3,39	4,87	3,92	2,52	12,00	7,42	8,77	12,25	12,99	6,99
12,10	2,18	3,38	4,86	3,93	2,46	12,10	7,40	8,74	12,15	12,92	6,99
12,20	2,18	3,37	4,83	3,93	2,41	12,20	7,38	8,69	12,15	12,80	7,00
12,30	2,18	3,35	4,80	3,95	2,36	12,30	7,39	8,65	12,05	12,78	7,02
12,40	2,18	3,34	4,78	3,96	2,33	12,40	7,34	8,60	11,97	12,74	7,06
12,50	2,19	3,33	4,74	4,00	2,32	12,50	7,32	8,59	11,91	12,61	7,11
12,60	2,20	3,31	4,72	4,04	2,31	12,60	7,31	8,52	11,92	12,48	7,11
12,70	2,20	3,30	4,69	4,08	2,30	12,70	7,29	8,45	11,84	12,36	7,16

12,80	2,20	3,29	4,68	4,14	2,31	12,80	7,29	8,43	11,77	12,36	7,20
12,90	2,21	3,29	4,65	4,21	2,34	12,90	7,24	8,41	11,73	12,30	7,22
13,00	2,21	3,29	4,62	4,24	2,39	13,00	7,22	8,38	11,76	12,24	7,22
13,10	2,22	3,30	4,61	4,30	2,41	13,10	7,24	8,36	11,69	12,11	7,29
13,20	2,23	3,30	4,61	4,37	2,45	13,20	7,28	8,32	11,67	11,99	7,37
13,30	2,24	3,30	4,59	4,43	2,51	13,30	7,31	8,31	11,68	11,94	7,39
13,40	2,25	3,30	4,58	4,48	2,57	13,40	7,35	8,28	11,68	11,83	7,44
13,50	2,26	3,30	4,56	4,51	2,65	13,50	7,38	8,25	11,68	11,75	7,45
13,60	2,27	3,31	4,56	4,54	2,68	13,60	7,41	8,24	11,67	11,73	7,47
13,70	2,27	3,31	4,54	4,56	2,73	13,70	7,52	8,23	11,71	11,68	7,49
13,80	2,28	3,32	4,53	4,58	2,77	13,80	7,52	8,24	11,69	11,68	7,52
13,90	2,28	3,32	4,52	4,57	2,82	13,90	7,58	8,22	11,74	11,65	7,51
14,00	2,28	3,31	4,50	4,57	2,86	14,00	7,63	8,23	11,77	11,64	7,51
14,10	2,27	3,31	4,49	4,57	2,90	14,10	7,73	8,23	11,80	11,64	7,51
14,20	2,27	3,30	4,48	4,56	2,92	14,20	7,77	8,24	11,86	11,63	7,51
14,30	2,28	3,30	4,46	4,55	2,93	14,30	7,79	8,26	11,86	11,65	7,48
14,40	2,28	3,28	4,44	4,51	2,94	14,40	7,83	8,27	11,89	11,68	7,48
14,50	2,28	3,27	4,44	4,48	2,95	14,50	7,87	8,27	11,91	11,73	7,48
14,60	2,28	3,26	4,43	4,46	2,95	14,60	7,88	8,30	11,93	11,78	7,46
14,70	2,27	3,25	4,42	4,45	2,96	14,70	7,90	8,31	11,94	11,82	7,44
14,80	2,27	3,23	4,40	4,41	2,96	14,80	7,90	8,32	11,98	11,84	7,44
14,90	2,27	3,21	4,39	4,41	2,95	14,90	7,91	8,34	12,01	11,88	7,40
15,00	2,26	3,19	4,37	4,35	2,94	15,00	7,92	8,36	12,05	11,92	7,39
15,10	2,25	3,17	4,35	4,30	2,94	15,10	7,93	8,37	12,05	11,96	7,35
15,20	2,23	3,16	4,35	4,24	2,91	15,20	7,93	8,37	12,07	11,95	7,31
15,30	2,22	3,15	4,33	4,12	2,88	15,30	7,89	8,40	12,09	12,00	7,30
15,40	2,22	3,13	4,32	4,05	2,86	15,40	7,89	8,43	12,07	12,08	7,26
15,50	2,20	3,11	4,30	3,99	2,81	15,50	7,87	8,43	12,07	11,25	7,19
15,60	2,19	3,10	4,29	3,95	2,77	15,60	7,85	8,46	12,08	11,25	7,19
15,70	2,18	3,07	4,28	3,93	2,73	15,70	7,79	8,47	12,03	11,29	7,13
15,80	2,18	3,05	4,28	3,88	2,70	15,80	7,59	8,47	11,94	11,34	7,08
15,90	2,17	3,04	4,26	3,84	2,65	15,90	7,56	8,47	11,94	11,43	7,05
16,00	2,15	3,03	4,17	3,91	2,62	16,00	7,53	8,48	11,87	11,43	7,00
16,10	2,15	3,02	4,18	4,02	2,58	16,10	7,53	8,47	11,79	11,43	6,93
16,20	2,14	3,02	4,18	4,02	2,55	16,20	7,53	8,46	11,79	11,43	6,89
16,30	2,13	3,01	4,18	4,02	2,51	16,30	7,53	8,46	11,70	11,43	6,88
16,40	2,11	3,01	4,19	4,02	2,50	16,40	7,53	8,46	11,71	11,43	6,77
16,50	2,11	3,01	4,20	4,02	2,50	16,50	7,53	8,45	11,62	11,43	6,74

APÊNDICE B – FORÇAS MÉDIAS DE ARRANCAMENTO EM RELAÇÃO AO DESLOCAMENTO SOFRIDO PELA BARRAS DE AÇOS DE 5 E 8mm – ENSAIOS AOS 28 DIAS.

ϕ 5mm	FORÇA MÉDIA (kN) - 28 DIAS DE IDADE					ϕ 8mm	FORÇA MÉDIA (kN) - 28 DIAS DE IDADE				
Esc (mm)	CAA- 1,2	CAA- 1,6	CAA- 2,0	CPV 0,45	CPV 0,55	Esc (mm)	CAA- 1,2	CAA- 1,6	CAA- 2,0	CPV 0,45	CPV 0,55
0,00	-	-	-	-	-	0,00	-	-	-	21,93	-
0,10	2,51	5,61	4,80	7,10	4,04	0,10	10,18	9,82	14,74	25,71	16,54
0,20	4,17	6,17	5,85	8,71	5,26	0,20	12,83	13,43	17,61	27,79	19,75
0,30	4,64	6,48	6,66	9,92	6,14	0,30	14,14	15,30	19,74	28,82	21,84
0,40	4,92	6,71	7,36	10,95	6,83	0,40	14,97	16,58	21,51	29,33	23,03
0,50	5,12	6,88	7,98	11,76	7,56	0,50	15,55	17,36	23,03	29,68	23,75
0,60	5,25	7,03	8,52	12,38	7,95	0,60	15,94	17,90	24,08	29,90	24,23
0,70	5,36	7,15	8,96	12,97	8,24	0,70	16,19	18,30	24,70	30,04	24,52
0,80	5,47	7,24	9,38	13,37	8,42	0,80	16,36	18,58	25,03	30,11	24,71
0,90	5,55	7,31	9,67	13,71	8,50	0,90	16,48	18,76	25,21	30,12	24,80
1,00	5,59	7,36	9,86	13,98	8,54	1,00	16,55	18,89	25,31	30,10	24,82
1,10	5,65	7,38	9,95	14,16	8,53	1,10	16,60	18,95	25,34	30,07	24,78
1,20	5,68	7,39	10,01	14,28	8,45	1,20	16,60	18,96	25,30	29,99	24,75
1,30	5,69	7,37	10,03	14,38	8,35	1,30	16,58	18,93	25,26	29,90	24,68
1,40	5,66	7,33	10,01	14,43	8,25	1,40	16,55	18,89	25,22	29,84	24,55
1,50	5,63	7,26	9,97	14,44	8,08	1,50	16,47	18,82	25,19	29,70	24,40
1,60	5,58	7,18	9,89	14,42	7,94	1,60	16,42	18,74	25,11	29,52	24,24
1,70	5,52	7,08	9,81	14,37	7,75	1,70	16,34	18,63	25,06	29,41	24,06
1,80	5,46	7,00	9,71	14,30	7,54	1,80	16,24	18,55	24,98	29,21	23,88
1,90	5,39	6,89	9,57	14,16	7,33	1,90	16,10	18,36	24,87	29,10	23,65
2,00	5,30	6,76	9,42	14,02	7,13	2,00	15,99	18,24	24,56	29,10	23,34
2,10	5,20	6,61	9,27	13,81	6,89	2,10	15,79	18,04	24,07	28,89	23,12
2,20	5,11	6,44	9,07	13,61	6,69	2,20	15,56	17,83	23,69	28,89	22,95
2,30	5,00	6,27	8,86	13,51	6,48	2,30	15,32	17,64	23,56	28,77	22,58
2,40	4,89	6,13	8,69	13,25	6,26	2,40	15,14	17,46	23,44	28,65	22,31
2,50	4,76	5,99	8,49	13,10	6,01	2,50	14,83	17,27	23,32	28,54	21,93
2,60	4,66	5,79	8,30	12,81	5,75	2,60	14,58	17,11	23,12	28,43	21,50
2,70	4,53	5,62	8,09	12,69	5,51	2,70	14,40	16,81	22,97	28,32	21,16
2,80	4,39	5,48	7,91	12,47	5,25	2,80	14,08	16,63	22,80	28,32	20,83
2,90	4,25	5,30	7,67	12,37	5,04	2,90	13,83	16,39	22,65	28,20	20,40
3,00	4,13	5,16	7,52	12,20	4,83	3,00	13,71	16,05	22,49	28,08	19,92
3,10	4,02	5,02	7,31	11,97	4,64	3,10	13,46	15,86	22,37	27,97	19,35
3,20	3,90	4,89	7,10	11,78	4,44	3,20	13,21	15,57	22,20	27,84	19,12
3,30	3,74	4,77	6,95	11,67	4,21	3,30	12,97	15,40	21,95	27,84	18,59
3,40	3,65	4,64	6,81	11,33	4,09	3,40	12,73	15,12	21,78	27,49	18,38
3,50	3,57	4,57	6,62	11,15	3,90	3,50	12,35	14,88	21,58	27,49	17,81

3,60	3,45	4,48	6,50	10,75	3,84	3,60	12,16	14,63	21,40	27,36	17,38
3,70	3,37	4,40	6,40	10,29	3,77	3,70	11,96	14,28	21,27	27,24	16,96
3,80	3,30	4,35	6,30	9,32	3,61	3,80	11,64	14,08	20,94	26,98	16,50
3,90	3,25	4,31	6,24	8,28	3,51	3,90	11,33	13,74	20,80	26,72	16,05
4,00	3,19	4,28	6,22	7,05	3,51	4,00	11,20	13,52	20,59	26,60	15,87
4,10	3,15	4,26	6,21	6,05	3,47	4,10	10,96	13,31	20,33	26,28	15,43
4,20	3,13	4,25	6,23	5,65	3,51	4,20	10,77	13,02	20,13	25,76	15,00
4,30	3,13	4,24	6,25	5,53	3,56	4,30	10,55	12,88	19,93	25,19	14,59
4,40	3,13	4,25	6,29	5,64	3,63	4,40	10,34	12,62	19,66	24,56	14,17
4,50	3,15	4,26	6,33	5,88	3,69	4,50	10,19	12,43	19,45	23,93	13,94
4,60	3,17	4,28	6,39	6,13	3,79	4,60	10,08	12,29	19,25	23,01	13,67
4,70	3,19	4,31	6,44	6,61	3,89	4,70	9,95	12,18	19,12	22,40	13,25
4,80	3,23	4,33	6,50	6,94	4,00	4,80	9,87	12,04	18,76	21,65	13,03
4,90	3,27	4,34	6,55	7,26	4,08	4,90	9,77	11,99	18,54	20,97	12,60
5,00	3,30	4,36	6,58	7,58	4,16	5,00	9,73	11,91	18,25	20,44	12,51
5,10	3,33	4,36	6,61	7,88	4,26	5,10	9,70	11,86	18,11	19,92	12,30
5,20	3,35	4,35	6,62	8,10	4,34	5,20	9,70	11,79	17,73	19,35	12,11
5,30	3,37	4,34	6,63	8,35	4,40	5,30	9,72	11,78	17,52	18,75	11,94
5,40	3,39	4,34	6,62	8,46	4,48	5,40	9,75	11,76	17,10	18,11	11,73
5,50	3,40	4,34	6,63	8,63	4,52	5,50	9,79	11,76	16,89	17,64	11,69
5,60	3,40	4,33	6,62	8,70	4,55	5,60	9,82	11,77	16,58	17,15	11,55
5,70	3,41	4,31	6,61	8,78	4,55	5,70	9,86	11,79	16,30	16,78	11,50
5,80	3,41	4,28	6,58	8,82	4,58	5,80	9,92	11,81	16,00	16,47	11,41
5,90	3,41	4,26	6,56	8,82	4,59	5,90	9,95	11,82	15,71	16,53	11,41
6,00	3,40	4,24	6,55	8,81	4,58	6,00	10,02	11,85	15,47	16,36	11,42
6,10	3,37	4,20	6,53	8,78	4,55	6,10	10,05	11,87	15,23	16,15	11,50
6,20	3,34	4,17	6,49	8,67	4,53	6,20	10,08	11,87	14,91	16,03	11,55
6,30	3,31	4,13	6,45	8,60	4,47	6,30	10,11	11,89	14,69	15,97	11,64
6,40	3,27	4,10	6,41	8,53	4,41	6,40	10,13	11,87	14,41	15,97	11,69
6,50	3,24	4,04	6,39	8,44	4,35	6,50	10,14	11,85	14,20	16,01	11,74
6,60	3,22	4,01	6,35	8,28	4,27	6,60	10,13	11,80	14,08	16,07	11,81
6,70	3,20	3,96	6,32	8,12	4,17	6,70	10,13	11,80	13,93	16,14	11,87
6,80	3,15	3,93	6,27	8,02	4,05	6,80	10,12	11,75	13,78	16,19	11,92
6,90	3,13	3,89	6,25	7,93	3,98	6,90	10,11	11,69	13,67	16,24	11,98
7,00	3,10	3,86	6,22	7,79	3,87	7,00	10,08	11,63	13,63	16,24	12,06
7,10	3,08	3,83	6,16	7,68	3,80	7,10	10,08	11,57	13,60	16,26	12,11
7,20	3,05	3,81	6,12	7,57	3,70	7,20	9,98	11,49	13,57	16,29	12,15
7,30	3,03	3,78	6,09	7,34	3,66	7,30	9,94	11,42	13,57	16,26	12,18
7,40	2,98	3,76	6,07	7,08	3,59	7,40	9,86	11,35	13,57	16,26	12,19
7,50	2,95	3,73	6,01	6,92	3,50	7,50	9,82	11,27	13,58	16,32	12,20
7,60	2,94	3,72	5,98	6,76	3,45	7,60	9,68	11,16	13,61	16,28	12,20
7,70	2,91	3,72	5,95	6,51	3,43	7,70	9,64	11,03	13,64	16,18	12,18
7,80	2,90	3,71	5,93	6,18	3,43	7,80	9,51	10,92	13,66	16,20	12,15
7,90	2,87	3,70	5,90	6,01	3,39	7,90	9,38	10,78	13,73	16,14	12,11
8,00	2,86	3,69	5,86	5,74	3,36	8,00	9,24	10,72	13,79	16,14	12,05
8,10	2,84	3,69	5,85	5,67	3,37	8,10	9,14	10,66	13,85	16,14	11,98

8,20	2,84	3,69	5,84	5,58	3,39	8,20	9,08	10,55	13,89	16,03	11,91
8,30	2,73	3,68	5,83	5,56	3,42	8,30	8,93	10,41	13,92	15,94	11,82
8,40	2,74	3,67	5,82	5,59	3,45	8,40	8,77	10,30	13,94	15,90	11,75
8,50	2,74	3,67	5,82	5,70	3,51	8,50	8,77	10,20	13,97	15,75	11,74
8,60	2,74	3,67	5,82	5,80	3,54	8,60	8,64	10,11	14,00	15,58	11,66
8,70	2,74	3,67	5,82	5,96	3,62	8,70	8,47	10,06	14,02	15,58	11,54
8,80	2,75	3,65	5,82	6,12	3,67	8,80	8,47	10,00	14,04	15,40	11,40
8,90	2,75	3,65	5,81	6,27	3,71	8,90	8,29	9,91	14,05	15,24	11,26
9,00	2,75	3,65	5,81	6,42	3,79	9,00	8,22	9,83	14,04	15,12	11,22
9,10	2,75	3,64	5,80	6,52	3,84	9,10	8,18	9,75	14,05	15,12	11,08
9,20	2,75	3,63	5,79	6,62	3,88	9,20	8,13	9,68	14,06	14,93	10,96
9,30	2,76	3,63	5,78	6,72	3,93	9,30	8,12	9,60	14,03	14,73	10,92
9,40	2,77	3,61	5,76	6,81	3,99	9,40	8,11	9,58	13,98	14,61	10,76
9,50	2,77	3,60	5,75	6,94	4,01	9,50	8,11	9,54	13,95	14,43	10,60
9,60	2,77	3,59	5,73	6,96	4,04	9,60	8,12	9,52	13,90	14,35	10,40
9,70	2,78	3,58	5,72	7,05	4,04	9,70	8,13	9,51	13,86	14,17	10,35
9,80	2,78	3,56	5,71	7,05	4,05	9,80	8,14	9,51	13,84	14,09	10,17
9,90	2,78	3,55	5,69	7,10	4,08	9,90	8,19	9,52	13,82	13,96	10,04
10,00	2,78	3,55	5,68	7,09	4,09	10,00	8,28	9,55	13,76	13,96	9,99
10,10	2,79	3,53	5,68	7,07	4,11	10,10	8,38	9,57	13,66	13,90	9,84
10,20	2,79	3,52	5,68	7,04	4,12	10,20	8,42	9,60	13,60	13,78	9,72
10,30	2,79	3,51	5,68	7,04	4,13	10,30	8,52	9,61	13,48	13,66	9,67
10,40	2,79	3,49	5,67	6,96	4,14	10,40	8,55	9,63	13,35	13,66	9,52
10,50	2,79	3,48	5,65	6,96	4,13	10,50	8,66	9,64	13,29	13,54	9,41
10,60	2,79	3,46	5,64	6,88	4,11	10,60	8,71	9,66	13,20	13,43	9,37
10,70	2,79	3,45	5,62	6,83	4,08	10,70	8,77	9,67	13,05	13,33	9,23
10,80	2,78	3,42	5,61	6,76	4,06	10,80	8,81	9,68	12,86	13,33	9,09
10,90	2,78	3,41	5,60	6,70	4,03	10,90	8,85	9,70	12,73	13,25	9,09
11,00	2,78	3,40	5,60	6,67	4,01	11,00	8,86	9,71	12,60	13,15	8,98
11,10	2,77	3,39	5,59	6,63	3,98	11,10	8,88	9,72	12,41	13,15	8,92
11,20	2,77	3,39	5,59	6,54	3,95	11,20	8,88	9,71	12,23	13,04	8,92
11,30	2,76	3,38	5,57	6,49	3,89	11,30	8,87	9,69	12,04	12,94	8,90
11,40	2,77	3,37	5,55	6,39	3,85	11,40	8,85	9,67	11,89	12,94	8,89
11,50	2,76	3,36	5,54	6,28	3,81	11,50	8,83	9,65	11,63	12,89	8,88
11,60	2,76	3,35	5,54	6,12	3,76	11,60	8,78	9,61	11,48	12,84	8,91
11,70	2,76	3,34	5,52	6,02	3,73	11,70	8,72	9,60	11,38	12,79	8,93
11,80	2,76	3,34	5,50	5,93	3,70	11,80	8,68	9,56	11,18	12,79	8,98
11,90	2,76	3,34	5,49	5,88	3,67	11,90	8,67	9,54	11,07	12,71	9,00
12,00	2,76	3,33	5,48	5,78	3,66	12,00	8,59	9,50	10,99	12,69	9,07
12,10	2,75	3,33	5,48	5,68	3,64	12,10	8,49	9,42	10,91	12,67	9,12
12,20	2,76	3,32	5,47	5,58	3,63	12,20	8,37	9,36	10,85	12,61	9,17
12,30	2,76	3,30	5,47	5,40	3,65	12,30	8,33	9,30	10,81	12,59	9,20
12,40	2,76	3,30	5,47	5,32	3,65	12,40	8,22	9,22	10,81	12,53	9,24
12,50	2,76	3,30	5,48	5,24	3,65	12,50	8,17	9,20	10,81	12,43	9,28
12,60	2,77	3,29	5,47	5,17	3,69	12,60	8,10	9,14	10,83	12,43	9,35
12,70	2,77	3,29	5,46	5,14	3,71	12,70	8,00	9,06	10,83	12,43	9,44

12,80	2,77	3,29	5,47	5,16	3,76	12,80	7,93	9,01	10,89	12,41	9,47
12,90	2,78	3,30	5,47	5,20	3,80	12,90	7,92	8,94	10,95	12,29	9,50
13,00	2,79	3,29	5,48	5,27	3,82	13,00	7,86	8,87	10,99	12,25	9,50
13,10	2,80	3,31	5,48	5,31	3,87	13,10	7,81	8,79	11,03	12,18	9,54
13,20	2,81	3,30	5,49	5,40	3,89	13,20	7,76	8,74	11,09	12,07	9,56
13,30	2,82	3,30	5,48	5,44	3,93	13,30	7,71	8,69	11,13	11,95	9,58
13,40	2,83	3,29	5,48	5,52	3,95	13,40	7,71	8,67	11,20	11,95	9,58
13,50	2,83	3,28	5,47	5,59	3,97	13,50	7,70	8,61	11,26	11,85	9,58
13,60	2,84	3,26	5,47	5,65	3,97	13,60	7,67	8,59	11,33	11,78	9,59
13,70	2,84	3,25	5,46	5,70	3,98	13,70	7,68	8,58	11,37	11,78	9,56
13,80	2,83	3,24	5,46	5,76	3,99	13,80	7,71	8,59	11,44	11,74	9,56
13,90	2,83	3,24	5,45	5,76	4,02	13,90	7,72	8,60	11,50	11,60	9,57
14,00	2,84	3,22	5,44	5,81	4,04	14,00	7,75	8,62	11,51	11,49	9,51
14,10	2,83	3,21	5,43	5,84	4,06	14,10	7,79	8,63	11,53	11,46	9,45
14,20	2,84	3,20	5,42	5,86	4,06	14,20	7,81	8,67	11,58	11,31	9,39
14,30	2,84	3,21	5,41	5,85	4,07	14,30	7,87	8,72	11,63	11,25	9,38
14,40	2,84	3,20	5,40	5,86	4,10	14,40	7,93	8,73	11,65	11,20	9,30
14,50	2,85	3,20	5,39	5,84	4,11	14,50	7,97	8,77	11,66	11,12	9,19
14,60	2,85	3,18	5,39	5,81	4,10	14,60	8,02	8,79	11,68	11,07	9,19
14,70	2,84	3,18	5,37	5,78	4,08	14,70	8,07	8,83	11,71	11,07	9,10
14,80	2,84	3,18	5,36	5,76	4,07	14,80	8,15	8,84	11,72	11,03	9,08
14,90	2,84	3,18	5,34	5,74	4,06	14,90	8,23	8,86	11,72	11,03	9,05
15,00	2,83	3,17	5,34	5,72	4,07	15,00	8,23	8,88	11,72	11,00	9,00
15,10	2,82	3,16	5,31	5,68	4,04	15,10	8,28	8,88	11,72	10,96	8,89
15,20	2,82	3,16	5,30	5,63	4,00	15,20	8,32	8,89	11,73	10,96	8,89
15,30	2,82	3,16	5,28	5,62	3,97	15,30	8,37	8,89	11,74	10,93	8,77
15,40	2,82	3,16	5,27	5,57	3,94	15,40	8,42	8,91	11,74	10,91	8,73
15,50	2,82	3,15	5,24	5,55	3,92	15,50	8,45	8,93	11,73	10,91	8,66
15,60	2,82	3,15	5,24	5,48	3,89	15,60	8,45	8,93	11,71	10,87	8,55
15,70	2,81	3,15	5,23	5,43	3,84	15,70	8,45	8,93	11,67	10,87	8,53
15,80	2,81	3,15	5,21	5,39	3,81	15,80	8,43	8,93	11,65	10,83	8,46
15,90	2,81	3,15	5,21	5,34	3,77	15,90	8,43	8,92	11,17	10,83	8,43
16,00	2,81	3,15	5,21	5,26	3,76	16,00	8,42	8,90	11,17	10,78	8,40
16,10	2,81	3,15	5,21	5,17	3,76	16,10	8,38	8,88	11,13	10,73	8,34
16,20	2,81	3,15	5,20	5,12	3,76	16,20	8,38	8,86	11,10	10,71	8,12
16,30	2,81	3,15	5,18	5,08	3,78	16,30	8,15	8,50	11,06	10,69	8,12
16,40	2,81	3,15	5,18	4,95	3,80	16,40	8,15	8,49	11,06	10,67	8,07
16,50	2,81	3,15	5,18	4,95	3,82	16,50	8,12	8,19	11,06	10,66	8,07

APÊNDICE C – FORÇAS MÉDIAS DE ARRANCAMENTO EM RELAÇÃO AO DESLOCAMENTO SOFRIDO PELA BARRAS DE AÇOS DE 5 E 8mm – ENSAIOS AOS 90 DIAS.

ϕ 5mm	FORÇA MÉDIA (kN) - 90 DIAS DE IDADE					ϕ 8mm	FORÇA MÉDIA (kN) - 90 DIAS DE IDADE				
	CAA-1,2	CAA-1,6	CAA-2,0	CPV 0,45	CPV 0,55		CAA-1,2	CAA-1,6	CAA-2,0	CPV 0,45	CPV 0,55
Esc (mm)						Esc (mm)					
0,00	-	-	-	5,48	-	0,00	-	-	3,63	5,00	-
0,10	2,51	4,69	5,50	7,79	4,89	0,10	10,49	13,36	16,93	20,30	16,72
0,20	4,17	5,76	6,69	9,25	5,83	0,20	12,61	15,22	19,68	24,72	20,27
0,30	4,64	6,64	7,60	10,29	6,65	0,30	13,84	16,54	21,65	26,87	22,67
0,40	4,92	7,40	8,38	11,19	7,31	0,40	14,63	17,33	23,19	28,03	24,38
0,50	5,12	8,04	9,08	11,91	7,89	0,50	15,21	17,84	24,36	28,87	25,54
0,60	5,25	8,60	9,69	12,43	8,34	0,60	15,65	18,17	25,11	29,39	26,30
0,70	5,36	9,08	10,25	12,82	8,73	0,70	15,99	18,42	25,62	29,69	26,77
0,80	5,47	9,51	10,71	13,13	9,05	0,80	16,26	18,54	25,87	29,93	27,06
0,90	5,55	9,87	11,10	13,35	9,27	0,90	16,45	18,62	25,99	30,04	27,24
1,00	5,59	10,14	11,44	13,51	9,43	1,00	16,59	18,66	26,02	30,12	27,34
1,10	5,65	10,35	11,64	13,58	9,52	1,10	16,70	18,69	26,00	30,13	27,38
1,20	5,68	10,48	11,78	13,59	9,55	1,20	16,78	18,68	25,94	30,10	27,34
1,30	5,69	10,55	11,84	13,56	9,52	1,30	16,84	18,64	25,85	29,95	27,24
1,40	5,66	10,55	11,87	13,51	9,43	1,40	16,83	18,58	25,75	29,82	27,11
1,50	5,63	10,54	11,86	13,43	9,32	1,50	16,81	18,52	25,64	29,59	26,96
1,60	5,58	10,49	11,81	13,32	9,15	1,60	16,78	18,45	25,46	29,28	26,74
1,70	5,52	10,43	11,75	13,19	8,93	1,70	16,72	18,35	25,38	28,96	26,55
1,80	5,46	10,31	11,66	12,99	8,74	1,80	16,63	18,27	25,21	28,60	26,29
1,90	5,39	10,15	11,56	12,70	8,44	1,90	16,51	18,13	25,09	28,26	25,98
2,00	5,30	10,00	11,44	12,48	8,19	2,00	16,42	17,99	24,90	27,78	25,75
2,10	5,20	9,85	11,23	12,29	7,90	2,10	16,31	17,85	24,80	27,27	25,44
2,20	5,11	9,66	11,10	11,99	7,60	2,20	16,17	17,72	24,62	26,88	25,18
2,30	5,00	9,44	10,94	11,79	7,25	2,30	15,99	17,49	24,40	26,64	24,94
2,40	4,89	9,26	10,74	11,59	6,94	2,40	15,85	17,32	24,27	26,08	24,58
2,50	4,76	9,02	10,51	11,28	6,61	2,50	15,61	17,13	24,08	25,68	24,23
2,60	4,66	8,78	10,34	10,97	6,33	2,60	15,38	16,96	23,85	25,04	23,93
2,70	4,53	8,57	10,14	10,59	6,11	2,70	15,18	16,71	23,52	24,76	23,72
2,80	4,39	8,32	9,89	10,38	5,75	2,80	14,95	16,51	23,34	23,86	23,27
2,90	4,25	8,05	9,69	9,86	5,44	2,90	14,75	16,25	23,17	23,40	22,91
3,00	4,13	7,85	9,46	9,63	5,19	3,00	14,51	16,08	22,91	23,01	22,62
3,10	4,02	7,61	9,28	9,28	4,83	3,10	14,26	15,89	22,64	22,29	22,25
3,20	3,90	7,39	9,10	8,81	4,57	3,20	13,97	15,62	22,44	21,78	21,86
3,30	3,74	7,20	8,92	8,57	4,24	3,30	13,69	15,36	22,04	21,09	21,64
3,40	3,65	6,98	8,70	8,34	4,04	3,40	13,48	15,23	21,84	20,57	21,17
3,50	3,57	6,82	8,57	8,04	3,69	3,50	13,23	14,95	21,55	19,95	20,70

3,60	3,45	6,66	8,41	7,44	3,48	3,60	12,98	14,71	21,34	18,82	20,28
3,70	3,37	6,51	8,26	7,24	3,37	3,70	12,70	14,42	20,93	18,25	19,79
3,80	3,30	6,39	8,09	7,03	3,24	3,80	12,49	14,22	20,71	17,81	19,38
3,90	3,25	6,30	8,01	6,93	3,16	3,90	12,28	13,98	20,44	16,99	19,13
4,00	3,19	6,21	7,91	6,85	3,13	4,00	12,04	13,75	20,16	16,99	18,72
4,10	3,15	6,17	7,81	6,83	3,13	4,10	11,80	13,60	19,89	16,30	18,24
4,20	3,13	6,15	7,74	6,97	3,18	4,20	11,61	13,37	19,54	15,77	17,94
4,30	3,13	6,15	7,70	7,11	3,27	4,30	11,45	13,15	19,20	15,40	17,67
4,40	3,13	6,16	7,66	7,26	3,40	4,40	11,27	12,99	18,91	15,19	17,25
4,50	3,15	6,19	7,65	7,50	3,55	4,50	11,14	12,86	18,78	15,14	16,77
4,60	3,17	6,25	7,65	7,83	3,70	4,60	11,03	12,70	18,38	15,04	16,56
4,70	3,19	6,30	7,66	8,03	3,90	4,70	10,92	12,58	18,11	15,01	16,18
4,80	3,23	6,35	7,67	8,33	4,05	4,80	10,85	12,46	17,83	15,04	15,80
4,90	3,27	6,39	7,69	8,54	4,23	4,90	10,75	12,38	17,62	15,13	15,56
5,00	3,30	6,44	7,72	8,69	4,38	5,00	10,71	12,32	17,33	15,25	15,43
5,10	3,33	6,47	7,75	8,83	4,56	5,10	10,69	12,23	17,13	15,39	15,06
5,20	3,35	6,50	7,78	8,93	4,68	5,20	10,68	12,18	16,92	15,54	14,94
5,30	3,37	6,54	7,79	9,00	4,79	5,30	10,69	12,17	16,60	15,74	14,78
5,40	3,39	6,56	7,80	9,04	4,92	5,40	10,71	12,13	16,47	15,90	14,62
5,50	3,40	6,58	7,81	9,07	4,99	5,50	10,73	12,11	16,22	16,05	14,41
5,60	3,40	6,59	7,82	9,07	5,02	5,60	10,76	12,11	16,02	16,31	14,29
5,70	3,41	6,59	7,82	9,03	5,05	5,70	10,78	12,10	15,85	16,43	14,24
5,80	3,41	6,58	7,81	8,98	5,04	5,80	10,80	12,11	15,67	16,54	14,20
5,90	3,41	6,56	7,81	8,92	5,00	5,90	10,84	12,10	15,55	16,59	14,18
6,00	3,40	6,52	7,79	8,78	4,96	6,00	10,87	12,08	15,49	16,62	14,18
6,10	3,37	6,50	7,77	8,70	4,86	6,10	10,90	12,07	15,38	16,63	14,21
6,20	3,34	6,47	7,74	8,62	4,79	6,20	10,90	12,06	15,28	16,63	14,27
6,30	3,31	6,42	7,72	8,52	4,70	6,30	10,93	12,07	15,17	16,59	14,32
6,40	3,27	6,36	7,70	8,43	4,59	6,40	10,93	12,05	15,09	16,46	14,36
6,50	3,24	6,33	7,65	8,34	4,51	6,50	10,94	11,99	15,00	16,38	14,43
6,60	3,22	6,27	7,60	8,15	4,37	6,60	10,94	11,99	14,93	16,29	14,50
6,70	3,20	6,20	7,58	8,05	4,25	6,70	10,91	11,95	14,85	16,29	14,54
6,80	3,15	6,17	7,53	7,86	4,12	6,80	10,89	11,90	14,79	16,28	14,58
6,90	3,13	6,12	7,48	7,76	4,01	6,90	10,83	11,87	14,76	16,14	14,64
7,00	3,10	6,05	7,44	7,56	3,85	7,00	10,79	11,83	14,74	15,92	14,70
7,10	3,08	5,99	7,41	7,45	3,71	7,10	10,75	11,81	14,70	15,63	14,72
7,20	3,05	5,94	7,38	7,36	3,63	7,20	10,71	11,78	14,69	15,63	14,76
7,30	3,03	5,87	7,35	7,26	3,47	7,30	10,60	11,70	14,69	15,43	14,75
7,40	2,98	5,82	7,32	7,06	3,36	7,40	10,56	11,66	14,68	15,06	14,73
7,50	2,95	5,77	7,27	6,86	3,25	7,50	10,48	11,58	14,66	14,98	14,71
7,60	2,94	5,73	7,23	6,77	3,19	7,60	10,33	11,51	14,65	14,84	14,69
7,70	2,91	5,68	7,21	6,71	3,12	7,70	10,32	11,39	14,64	14,76	14,63
7,80	2,90	5,62	7,13	6,66	3,03	7,80	10,21	11,30	14,64	14,41	14,59
7,90	2,87	5,61	7,09	6,63	3,00	7,90	10,08	11,25	14,62	14,20	14,55
8,00	2,86	5,58	7,04	6,65	2,98	8,00	9,99	11,17	14,60	14,20	14,49
8,10	2,84	5,55	7,02	6,70	2,98	8,10	9,92	11,10	14,57	13,82	14,40

8,20	2,84	5,53	6,98	6,84	2,99	8,20	9,83	11,06	14,53	13,60	14,33
8,30	2,73	5,49	6,93	6,94	3,03	8,30	9,71	10,96	14,49	13,60	14,27
8,40	2,74	5,46	6,90	7,14	3,08	8,40	9,68	10,86	14,45	13,22	14,18
8,50	2,74	5,44	6,87	7,34	3,18	8,50	9,57	10,84	14,40	12,98	14,10
8,60	2,74	5,43	6,83	7,43	3,24	8,60	9,51	10,75	14,35	12,98	13,97
8,70	2,74	5,43	6,81	7,53	3,35	8,70	9,45	10,68	14,29	12,77	13,83
8,80	2,75	5,42	6,78	7,73	3,46	8,80	9,38	10,56	14,25	12,59	13,74
8,90	2,75	5,42	6,76	7,92	3,59	8,90	9,31	10,49	14,17	12,59	13,59
9,00	2,75	5,40	6,75	8,03	3,67	9,00	9,30	10,43	14,08	12,44	13,47
9,10	2,75	5,40	6,72	8,11	3,76	9,10	9,26	10,37	14,01	12,34	13,38
9,20	2,75	5,38	6,72	8,21	3,84	9,20	9,24	10,32	13,91	12,37	13,21
9,30	2,76	5,38	6,71	8,24	3,97	9,30	9,24	10,29	13,83	12,36	13,10
9,40	2,77	5,37	6,70	8,29	4,07	9,40	9,22	10,26	13,73	12,34	12,93
9,50	2,77	5,37	6,70	8,30	4,15	9,50	9,21	10,24	13,60	12,41	12,81
9,60	2,77	5,35	6,70	8,30	4,20	9,60	9,21	10,22	13,50	12,49	12,67
9,70	2,78	5,35	6,69	8,27	4,26	9,70	9,23	10,19	13,42	12,57	12,50
9,80	2,78	5,35	6,68	8,21	4,30	9,80	9,26	10,18	13,31	12,70	12,45
9,90	2,78	5,33	6,65	8,14	4,33	9,90	9,28	10,17	13,22	12,70	12,35
10,00	2,78	5,32	6,63	8,05	4,33	10,00	9,33	10,15	13,10	12,72	12,16
10,10	2,79	5,31	6,60	7,97	4,32	10,10	9,34	10,13	12,96	12,82	12,09
10,20	2,79	5,29	6,59	7,89	4,30	10,20	9,39	10,12	12,87	12,91	11,93
10,30	2,79	5,27	6,56	7,89	4,27	10,30	9,46	10,13	12,81	12,98	11,78
10,40	2,79	5,25	6,51	7,79	4,22	10,40	9,48	10,12	12,68	12,99	11,72
10,50	2,79	5,24	6,48	7,70	4,18	10,50	9,52	10,08	12,56	13,00	11,59
10,60	2,79	5,23	6,42	7,60	4,11	10,60	9,53	10,06	12,46	13,00	11,51
10,70	2,79	5,21	6,40	7,50	4,02	10,70	9,55	10,04	12,44	12,98	11,44
10,80	2,78	5,19	6,36	7,41	3,94	10,80	9,59	10,03	12,33	12,97	11,32
10,90	2,78	5,15	6,32	7,20	3,86	10,90	9,61	10,01	12,23	12,97	11,22
11,00	2,78	5,13	6,29	7,20	3,78	11,00	9,61	9,97	12,16	12,96	11,17
11,10	2,77	5,10	6,28	7,00	3,69	11,10	9,63	9,93	12,13	12,92	11,11
11,20	2,77	5,07	6,24	6,90	3,65	11,20	9,62	9,92	12,08	12,91	11,03
11,30	2,76	5,03	6,21	6,90	3,54	11,30	9,61	9,89	12,04	12,84	10,96
11,40	2,77	5,00	6,19	6,72	3,45	11,40	9,59	9,85	12,00	12,75	10,91
11,50	2,76	4,99	6,15	6,72	3,36	11,50	9,59	9,79	11,95	12,75	10,91
11,60	2,76	4,95	6,12	6,65	3,28	11,60	9,54	9,76	11,92	12,68	10,88
11,70	2,76	4,93	6,10	6,59	3,24	11,70	9,48	9,70	11,92	12,62	10,86
11,80	2,76	4,88	6,07	6,57	3,18	11,80	9,42	9,64	11,91	12,60	10,86
11,90	2,76	4,85	6,05	6,56	3,12	11,90	9,36	9,59	11,93	12,58	10,88
12,00	2,76	4,84	6,03	6,61	3,09	12,00	9,31	9,50	11,92	12,50	10,89
12,10	2,75	4,80	5,99	6,69	3,08	12,10	9,25	9,46	11,97	12,50	10,90
12,20	2,76	4,79	5,96	6,78	3,06	12,20	9,19	9,37	12,01	12,38	10,89
12,30	2,76	4,76	5,93	6,86	3,07	12,30	9,10	9,29	12,06	12,22	10,89
12,40	2,76	4,75	5,91	6,96	3,09	12,40	9,08	9,24	12,09	12,22	10,89
12,50	2,76	4,72	5,89	7,06	3,10	12,50	9,00	9,19	12,12	12,06	10,89
12,60	2,77	4,70	5,87	7,17	3,14	12,60	8,90	9,11	12,20	11,95	10,89
12,70	2,77	4,69	5,85	7,26	3,20	12,70	8,82	9,02	12,23	11,95	10,89

12,80	2,77	4,68	5,80	7,36	3,25	12,80	8,77	8,95	12,25	11,81	10,89
12,90	2,78	4,67	5,80	7,43	3,33	12,90	8,71	8,92	12,28	11,74	10,90
13,00	2,79	4,66	5,78	7,50	3,36	13,00	8,62	8,84	12,30	11,66	10,91
13,10	2,80	4,66	5,77	7,57	3,43	13,10	8,59	8,77	12,35	11,59	10,91
13,20	2,81	4,64	5,75	7,63	3,53	13,20	8,47	8,77	12,38	11,47	10,91
13,30	2,82	4,63	5,73	7,63	3,56	13,30	8,41	8,65	12,39	11,47	10,91
13,40	2,83	4,62	5,72	7,68	3,64	13,40	8,40	8,62	12,40	11,34	10,91
13,50	2,83	4,60	5,68	7,72	3,73	13,50	8,37	8,57	12,41	11,23	10,85
13,60	2,84	4,59	5,65	7,71	3,79	13,60	8,33	8,53	12,40	11,23	10,85
13,70	2,84	4,59	5,65	7,71	3,86	13,70	8,31	8,53	12,39	11,24	10,83
13,80	2,83	4,58	5,62	7,69	3,90	13,80	8,32	8,51	12,36	11,22	10,82
13,90	2,83	4,58	5,60	7,65	3,96	13,90	8,31	8,50	12,32	11,26	10,79
14,00	2,84	4,57	5,59	7,63	4,01	14,00	8,35	8,48	12,33	11,21	10,78
14,10	2,83	4,56	5,58	7,58	4,04	14,10	8,35	8,48	12,30	11,19	10,77
14,20	2,84	4,55	5,55	7,58	4,06	14,20	8,40	8,47	12,28	11,24	10,70
14,30	2,84	4,53	5,52	7,51	4,07	14,30	8,43	8,48	12,23	11,24	10,70
14,40	2,84	4,51	5,49	7,48	4,06	14,40	8,51	8,47	12,19	11,31	10,67
14,50	2,85	4,51	5,48	7,48	4,05	14,50	8,58	8,49	12,16	11,41	10,62
14,60	2,85	4,47	5,46	7,44	4,04	14,60	8,63	8,50	12,13	11,44	10,62
14,70	2,84	4,46	5,42	7,39	3,99	14,70	8,69	8,49	12,05	11,44	10,58
14,80	2,84	4,43	5,42	7,30	3,92	14,80	8,71	8,49	11,93	11,46	10,58
14,90	2,84	4,41	5,40	7,30	3,91	14,90	8,76	8,53	11,93	11,48	10,54
15,00	2,83	4,39	5,40	7,23	3,87	15,00	8,80	8,63	11,82	11,49	10,49
15,10	2,82	4,37	5,38	7,16	3,80	15,10	8,82	8,60	11,73	11,51	10,45
15,20	2,82	4,34	5,37	7,16	3,77	15,20	8,88	8,60	11,67	11,51	10,40
15,30	2,82	4,32	5,34	7,08	3,67	15,30	8,92	8,57	11,62	11,11	10,35
15,40	2,82	4,31	5,33	7,08	3,60	15,40	8,93	8,56	11,53	11,11	10,30
15,50	2,82	4,27	5,29	7,02	3,58	15,50	8,95	8,56	11,37	11,11	10,25
15,60	2,82	4,25	5,25	6,97	3,44	15,60	8,96	8,54	11,37	11,11	10,20
15,70	2,81	4,23	5,24	6,92	3,39	15,70	8,96	8,51	11,31	10,92	9,98
15,80	2,81	4,23	5,20	6,92	3,35	15,80	8,96	8,51	11,26	10,92	9,92
15,90	2,81	4,16	5,20	6,89	3,33	15,90	8,96	8,46	11,23	10,92	9,88
16,00	2,81	4,15	5,16	6,89	3,30	16,00	8,96	8,43	11,21	10,92	9,81
16,10	2,81	4,14	5,11	6,90	3,27	16,10	8,65	8,38	11,19	10,92	9,81
16,20	2,81	4,14	5,10	6,90	3,26	16,20	8,65	8,38	11,15	10,92	9,80
16,30	2,81	4,12	5,08	7,28	3,26	16,30	8,65	8,38	11,13	10,92	9,73
16,40	2,81	4,12	5,04	7,28	3,26	16,40	8,65	8,38	11,14	10,92	9,73
16,50	2,81	4,12	5,04	7,28	3,26	16,50	8,65	8,38	11,15	10,92	9,68