

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ANDRÉ LUIZ SIGNORI

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ADENSAMENTO DO CONCRETO FRENTE À
RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA ENTRE AÇO E CONCRETO**

São Leopoldo

2018

ANDRÉ LUIZ SIGNORI

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ADENSAMENTO DO CONCRETO FRENTE À
RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA ENTRE AÇO E CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil, pelo Curso de
Engenharia Civil da Universidade do Vale
do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Ms. Diego Schneider

São Leopoldo
2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por todas as oportunidades dadas a mim, assim como a saúde e a capacidade para vencer os obstáculos.

A toda minha família, por toda estrutura e suporte para alcançar os objetivos, em especial, ao meu pai Luiz Carlos Signori, à minha mãe Melita Lazzari Signori, e irmãs Caroline Signori e Luiza Signori, por todo apoio e auxílio.

À minha namorada Bianca Carlin Cadore, por toda a assistência, companheirismo e carinho.

Aos irmãos, não de sangue, mas de calculadora e coração, que fiz durante a graduação, com os quais troquei conhecimentos, momentos e evolui tanto no âmbito técnico como no pessoal, em especial Gabriel Bottin, Matheus Carrer, Francisco Pinto, Guilherme Hennemann e Kelvin Oliveira.

A todos os (as) professores que participaram da minha formação acadêmica, por todos os conhecimentos e lições recebidas. Em especial ao meu orientador Prof. MS. Diego Schneider.

À empresa Concresul, pela doação dos materiais utilizados neste estudo, em especial ao Eng. Civil Marcelo Krumenauer, pela sua receptividade e prontidão para ajudar.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram para que eu me tornasse a pessoa que sou hoje, e a todos que me auxiliaram, torceram e ainda torcem para o meu sucesso.

RESUMO

O funcionamento conjunto entre aço e concreto é uma das premissas básicas para o funcionamento do concreto armado como elemento estrutural. Para que ambos os materiais trabalhem em conjunto é fundamental que haja a solidarização entre os mesmos em forma de aderência. Existem diversos fatores que interferem no comportamento solidário entre os componentes do concreto armado, sendo um deles a qualidade do concreto circunvizinho à barra de aço. As condições de adensamento influenciam bastante no que diz respeito à qualidade do concreto, principalmente nas faces superiores do elemento, onde este está sujeito a ser prejudicado devido à segregação, reduzindo as características mecânicas do concreto nesta região. Diante deste fato, este trabalho tem por objetivo estudar a influência do adensamento em relação à aderência entre aço e concreto, por meio da realização de ensaios de arrancamento do tipo *pullout test*, variando a posição da barra entre boa e má aderência e a forma de adensamento em manual, mecânica e sem adensamento, com o uso de concreto autoadensável. Assim, verificou-se a influência do tipo de adensamento em relação a aderência, onde o concreto autoadensável, devido sua capacidade de preencher melhor os vazios, apresentou melhores resultados de tensão, seguido pelo adensamento mecânico, e por último o manual. Dessa forma, percebe-se a clara vantagem da utilização do concreto autoadensável frente à aderência nas estruturas de concreto armado, tendo em vista que o mesmo não depende da influência do operador para compactá-lo. Além disso, pode-se verificar que o adensamento manual mostrou-se ineficaz por apresentar valores de tensão inferiores aos de projeto calculados segundo a NBR 6118 (ANBT, 2014), nos casos em que a barra esteve posicionada em zona de má aderência, por esse motivo, deve-se evitar seu uso para peças com altura superior a 30 centímetros. Já para os casos de adensamento mecânico e auto compactação do concreto, os resultados encontrados apresentaram-se acima dos calculados.

Palavras chave: aderência, adensamento, posição da armadura, concreto convencional, concreto autoadensável.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração geométrica para barras nervuradas	23
Figura 2 – Redistribuição das tensões de tração no <i>Estágio II</i>	26
Figura 3 – Tensões tangenciais geradas pela aderência	27
Figura 4 – Aderência por adesão	28
Figura 5 – Aderência por atrito	29
Figura 6 – Ação mecânica entre nervuras e concreto	30
Figura 7 – Rugosidade do aço em função de sua fabricação e conservação	32
Figura 8 – Situações de boa e má aderência	37
Figura 9 – Dimensões dos exemplares do ensaio de arrancamento.....	43
Figura 10 – Fluxograma de nomeação dos corpos de prova	43
Figura 11 – Preparação das barras de aço	49
Figura 12 – Posicionamento da barra junto à forma.....	50
Figura 13 – Exemplares moldados.....	52
Figura 14 – Cura dos corpos de prova	53
Figura 15 – Separação dos corpos de prova de arrancamento.....	53
Figura 16 – Instrumentação de ensaios de arrancamento	55
Figura 17 – Posição dos prismas extraídos	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica dos agregados	45
Gráfico 2 – Curvas tensão aderente x deslocamento para adensamento manual	59
Gráfico 3 - Curvas tensão aderente x deslocamento para adensamento mecânico .	59
Gráfico 4 - Curvas tensão aderente x deslocamento para autoadensável	60
Gráfico 5 – Curvas tensão x deslocamento em zona de má aderência.	66
Gráfico 6 – Curvas tensão x deslocamento em zona de boa aderência	68
Gráfico 7 – Tensão aderente e f_{c7} para adensamento manual	73
Gráfico 8 - Tensão aderente e f_{c7} para adensamento mecânico.....	74
Gráfico 9 - Tensão aderente e f_{c7} para autoadensável	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores mínimos de coeficiente superficial conforme o diâmetro	21
Tabela 2 – Estruturação do programa experimental	40
Tabela 3 – Resultados dos ensaios de caracterização granulométrica.....	45
Tabela 4 – Apresentação dos traços iniciais	46
Tabela 5 – Resultados de trabalhabilidade do concreto.....	47
Tabela 6 – Resultados de compressão dos traços piloto	48
Tabela 7 – Quantitativo de materiais para moldagem	51
Tabela 8 – Resultados obtidos nos ensaios de arrancamento da série 1	61
Tabela 9 - Resultados obtidos nos ensaios de arrancamento da série 2	61
Tabela 10 - Resultados obtidos nos ensaios de arrancamento da série 3.....	62
Tabela 11 – Resultados ensaio de compressão.....	63
Tabela 12 – Verificação de trabalhabilidade	64
Tabela 13 – Resultados ensaio de absorção capilar	65
Tabela 14 – Desvios padrão e coeficientes de variação	69
Tabela 15 – Relação boa x má aderência e redução de resistência	70
Tabela 16 – Resultados obtidos x Valores calculados	71
Tabela 17 – Médias de resultados de absorção capilar	76
Tabela 18 – Relação M/B na absorção x relação B/M no arrancamento	77

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Concreto armado
CAA	Concreto autoadensável
CC	Concreto convencional
EFNARC	<i>European Federation for Specialist Constriction Chemicals and Concrete Systems</i>
kN	Quilonewton
$l_{b,min}$	Comprimento de ancoragem mínimo
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NM	Norma Mercosul
MPa	Megapascal
RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux e les Constructions</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	DELIMITAÇÃO DO TEMA	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO.....	17
2.1.1	Concreto convencional	18
2.1.2	Concreto auto adensável	18
2.2	AÇO PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	20
2.3	CONCRETO ARMADO COMO ELEMENTO ESTRUTURAL	23
2.3.1	Funcionamento estrutural	23
2.3.2	Controle de qualidade	24
2.4	ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO.....	25
2.4.1	Fenômenos de aderência	27
2.4.1.1	Aderência por adesão	27
2.4.1.2	Aderência por atrito.....	28
2.4.1.3	Aderência mecânica	29
2.4.2	Fatores que influenciam a aderência	31
2.4.2.1	Influência do concreto	31
2.4.2.2	Influência da barra de aço.....	32
2.4.2.3	Influência da posição da barra	33
2.4.2.4	Cobrimento e espaçamento entre barras.....	34
2.5	ANCORAGEM DE ARMADURAS.....	34
2.5.1	Prerrogativas da NBR 6118 para ancoragem por aderência	35
2.5.1.1	Valores das resistências de aderência	35
2.5.1.2	Ancoragem de armaduras passivas por prolongamento retilíneo	37
2.5.1.3	Comprimento de ancoragem.....	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	ESTRUTURAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	40
3.2	DEFINIÇÃO DO ENSAIO E DAS VARIÁVEIS	41

3.2.1	Definição do ensaio e normativa	41
3.2.2	Variáveis	42
3.2.3	Dimensões dos corpos de prova	42
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	44
3.3.1	Materiais aglomerantes	44
3.3.2	Agregados	44
3.3.3	Aditivos químicos	45
3.4	ESCOLHA DOS TRAÇOS UTILIZADOS	46
3.4.1	Definição dos traços piloto	46
3.4.2	Características dos traços piloto e escolha dos traços	47
3.5	CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	48
3.5.1	Montagem das fôrmas e preparação das barras	49
3.5.2	Moldagem dos corpos de prova	50
3.5.3	Cura e corte dos corpos de prova	52
3.6	EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO E COMPRESSÃO	53
3.7	EXTRAÇÃO E ENSAIO DE ABSORÇÃO CAPILAR	56
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	58
4.1	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	58
4.1.1	Ensaio de arrancamento (<i>pull-out test</i>)	58
4.1.2	Controle do concreto	62
4.1.3	Resultados absorção capilar	64
4.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS	66
4.2.1	Análise do comportamento dos gráficos	66
4.2.2	Análise da variação dos resultados	68
4.2.3	Relação entre boa e má aderência e comparativo com a NBR 6118 ..	70
4.2.4	Análise da influência da resistência à compressão	73
4.2.5	Análise de resultados em relação a porosidade	75
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que o concreto é o segundo material mais consumido no mundo, o que salienta a difusão do concreto armado como sistema estrutural por diversos países. Segundo Pedroso (2009), esse sistema pode ser encontrado em diversas tipologias de estrutura, tanto em casas unifamiliares, como em estruturas de maior porte, como pontes, usinas hidrelétricas e nucleares, entre outras.

O aumento da utilização desse sistema estrutural tem relação direta com suas vantajosas propriedades. Metha e Monteiro (2008), destacam a maior resistência à degradação pela ação da água, em comparação aos demais materiais de construção como aço e madeira, a abundância de seus materiais componentes, a possibilidade de moldar o concreto em diferentes formas e a elevada resistência ao fogo.

Um dos principais componentes do concreto é o cimento, que é produzido em larga escala. Conforme dados do *Mineral Commodity Summaries* (2016), apresentado pelo Instituto de Estudos Geológicos dos Estados Unidos/*United States Geological Survey* (USGS), a produção mundial de cimento é estimada em aproximadamente quatro bilhões e cem milhões de toneladas. Este mesmo documento indica ainda que no Brasil são produzidos cerca de 72 milhões de toneladas de cimento, sendo classificado como o quinto maior produtor mundial.

Tratando-se ainda da produção de cimento, Neville (2013) afirma que ao longo dos anos houve grande avanço nos métodos de fabricação do cimento, o que possibilitou o desenvolvimento de cimentos para atender as mais diversas finalidades.

Estes diversos tipos de cimento servem para atender a demanda do mercado, pois, junto ao crescimento da indústria da construção civil e principalmente o aumento considerável da complexidade das estruturas de concreto armado, surgem novas exigências quanto à qualidade dos materiais empregados.

Desta forma, com o passar dos anos, ocorreram grandes desenvolvimentos tecnológicos na indústria da construção civil, em especial frente ao concreto, com a criação de concretos de alto desempenho e que não necessitam de compactação. Desta forma, a partir da necessidade de estruturas de maior durabilidade e que seja construída de forma rápida, surge a tecnologia do concreto autoadensável, por reduzir o tempo e o custo de promover seu adensamento (ALMEIDA FILHO *et. al.*, 2008).

A preocupação com a durabilidade e a vida útil das estruturas foi intensificada nos últimos anos, principalmente pela relevância e necessidade de se tratar do

assunto sustentabilidade na construção civil, que é a atividade humana mais impactante para o meio ambiente.

Neste contexto, surge em 2013 a Norma NBR 15575 (ABNT, 2013), que regulamenta e define parâmetros mínimos de aceitação de desempenho nos diversos sistemas das edificações de cunho residencial. Esta norma baseia-se em três parâmetros gerais de avaliação: segurança estrutural, habitabilidade e sustentabilidade. Nos critérios de sustentabilidade é requerida uma vida útil da estrutura da edificação de pelo menos 50 anos. Sendo assim, é de responsabilidade do projetista garantir que o sistema estrutural se mantenha estável, independente do material utilizado.

Com relação às estruturas de concreto armado, considera-se vital a aderência entre aço e concreto, de modo a garantir a estabilidade estrutural do sistema durante o tempo, levando em consideração que diversos autores como Araújo (2003, v.1), França (2004) e Tutikian, Hilgert e Howland (2014), afirmam que as propriedades do concreto armado dependem do trabalho conjunto entre aço e concreto, sendo essa solidarização somente possível através da aderência entre ambos.

1.1 JUSTIFICATIVA

A indústria da construção civil vem apresentando diversas inovações em termos de materiais e técnicas construtivas, uma destas inovações que vem ganhando aplicabilidade é a tecnologia do concreto autoadensável, principalmente utilizada em indústrias de pré-fabricados. Em contraponto a esses avanços, o setor ainda tende ao conservadorismo onde nota-se um certo receio ou até mesmo desconhecimento destes avanços, por parte de projetistas e construtores, fazendo com que a construção se mantenha refém de técnicas executivas que dependem da mão de obra, que muitas vezes é desqualificada, prejudicando a qualidade e durabilidade da edificação.

É vital que o concreto seja adensado corretamente, como ressalta Neville (2013), as propriedades do concreto endurecido como a resistência mecânica, durabilidade e estabilidade volumétrica são fortemente afetados pelo grau de adensamento, sendo essencial a trabalhabilidade do concreto fresco, para que ocorra um adequado adensamento e conseqüentemente a não ocorrência de segregação.

Quanto à aderência entre aço e concreto, encontram-se inúmeros estudos, inclusive em relação ao concreto autoadensável, como o de Almeida Filho *et. al.*,

(2008), onde os autores afirmam que o CAA apresenta pequena variabilidade nos resultados que dizem respeito resistência de aderência, mostrando-se um material confiável e de grande potencial para o mercado da construção civil. Entretanto pouco se estuda atualmente a influência do adensamento na resistência de aderência.

Desta forma, o presente estudo busca entender e mensurar essa influência tanto para concretos convencionais, considerando a diferentes formas de adensamento e posição da barra em relação a concretagem.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a possível influência no adensamento do concreto frente à aderência entre aço e concreto, comparando concreto convencional com compactação manual e mecânica e, concreto auto adensável.

1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho tem por objetivos específicos:

- a) Quantificar as diferenças de tensão entre a armadura e o concreto conforme a posição da barra no elemento estrutural e comparar com o coeficiente da NBR 6118 que trata de boa e ou má aderência;
- b) Comparar os resultados experimentais nas diversas configurações de adensamento e posição da barra, com os valores de tensão utilizadas em projeto, calculados conforme a NBR 6118;
- c) Verificar a influência das características físicas no concreto, como resistência a compressão e absorção capilar frente à aderência.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O trabalho tem o propósito de avaliar o comportamento da aderência entre aço e concreto, levando em consideração as práticas executivas, como o adensamento mecânico do concreto, que por muitas vezes é realizado de forma inadequada. Neste

contexto, o trabalho inclui técnicas construtivas mais atuais como o uso do concreto autoadensável, onde pela ausência da vibração, apresenta uma maior confiabilidade na homogeneidade do concreto.

A diferença da composição do concreto, causada pela segregação que ocorre durante o adensamento, tende a constituir um concreto de menor qualidade na parte superior do elemento estrutural, afetando a aderência das barras dispostas nesta região onde o concreto que a circunda qualidade reduzida.

A ineficiência da aderência entre os materiais que compõem as estruturas de concreto armado pode causar diversos problemas, visto que o funcionamento conjunto entre esses só é possível através da aderência, sendo uma característica vital para garantir a durabilidade e atingir a vida útil para a qual a estrutura foi projetada.

A norma de projetos de estruturas de concreto, NBR 6118 (ABNT, 2014), indica diversos fatores que influenciam na qualidade da aderência, transformando estes em coeficientes utilizados para o cálculo da resistência de aderência, além de apresentar comprimentos de ancoragem. Dentre estes coeficientes, existe um que leva em consideração a posição da barra em relação a concretagem, reconhecendo a influência do adensamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por finalidade apresentar uma revisão bibliográfica sobre os materiais utilizados na composição de estruturas em concreto armado, e como as propriedades destes influenciam no fenômeno da aderência. Além de serem apresentados mecanismos de funcionamento de ligação entre aço e concreto e a importância deste fenômeno nas estruturas, tendo por objetivo criar uma base para a realização de análise e compreensão dos métodos e resultados obtidos no estudo.

2.1 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO

O homem foi capaz de desenvolver um material que quando endurecido, apresenta resistência similar a das rochas naturais e, quando no estado fresco caracteriza-se como composto plástico. Portanto, pode-se definir o concreto como uma pedra artificial, a qual pode ser moldada conforme a imaginação construtiva do homem. Esse material, segundo a Federação Iberoamericana de Concreto Pré-Misturado (FIHP) é o segundo mais consumido pela humanidade, com um consumo médio de 1,9 tonelada de concreto por habitante por ano, estando atrás apenas da água potável. (PEDROSO, 2009).

O motivo do concreto ser um material construtivo amplamente utilizado no mundo são suas características, segundo Metha e Monteiro (2008), este tem a facilidade de se adaptar aos projetos arquitetônicos devido a sua moldabilidade. Ao mesmo tempo, possui características de resistência à compressão elevada, resistindo aos esforços solicitantes necessários para manter as estruturas em equilíbrio com um custo de produção relativamente baixo frente a materiais como o aço, sendo suas matérias primas encontradas em abundância no mercado.

Apesar de ser o segundo material mais consumido no mundo, o concreto possui uma grande variabilidade, sendo representado por qualquer produto ou massa constituído a partir do uso de um meio cimentante, podendo definir uma larga gama de produtos (NEVILLE, 2013).

Neville (2013) ainda complementa que os materiais que compõem concretos com aspectos bons e ruins são os mesmos. Sendo assim, para a produção de um concreto com características positivas, deve-se dosar a mistura tendo em vista o conhecimento das propriedades desejadas e do comportamento do mesmo, para que

atenda aos critérios de resistência mecânica quando endurecido e, em seu estado fresco, à consistência e coesão.

2.1.1 Concreto convencional

Segundo Pinheiro *et. al*, (2010), o concreto é um material de construção que tem origem da mistura, em proporções adequadas, de aglomerantes, agregados e água e, frequentemente junto a estes são acrescentados aditivos e adições. Os aglomerantes proporcionam a união dos demais materiais, sendo no concreto geralmente empregado o cimento Portland, um aglomerante hidráulico que reage com a porção de água da mistura. Quanto aos agregados, consideram-se partículas minerais que contribuem para a estabilidade volumétrica do concreto, além de reduzir custos, sendo divididos em dois grupos, miúdos e graúdos, conforme a dimensão.

Por ser um material compósito, a evolução do concreto relacionou-se ao desenvolvimento dos seus componentes. A partir do desenvolvimento de cimentos mais finos, o que aumenta a superfície de contato das partículas, passou-se a reduzir sua quantidade necessária no concreto, para atingir as mesmas resistências. Além disso, a partir dos anos 70 os aditivos começaram a mudar o comportamento do concreto (LOTURCO, 2008).

Atualmente, segundo Tutikian e Dal Molin (2008), as técnicas construtivas exigem concretos com características especiais, como por exemplo, concretos de alta resistência, autoadensáveis, com adição de fibras, coloridos, entre outros. Com a intenção de acompanhar essa demanda, nas últimas décadas, tem ocorrido um avanço na área da tecnologia do concreto, tornando inapropriado estudar apenas o concreto convencional.

2.1.2 Concreto auto adensável

Em meio aos avanços tecnológicos do concreto, foi desenvolvido no Japão, em 1988, o concreto autoadensável (CAA), o qual possui a capacidade de preencher os espaços nas fôrmas por conta própria, sem ser necessário qualquer meio de vibração ou compactação externa (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

O desenvolvimento do concreto autoadensável se fez necessário por diversos motivos, como a dificuldade de executar estruturas com altas taxas de armadura e

com fôrmas complexas sem que a qualidade e durabilidade do concreto fossem afetadas, a necessidade de conter os custos e prazos de execução, alcançados através da redução no número de trabalhadores e aumento da trabalhabilidade do concreto (LISBÔA, 2004).

Segundo Repette (2008), por ser um material de aplicação rápida e que requer menos mão de obra, o concreto autoadensável é cada vez mais utilizado na construção civil, tanto no setor de pré-moldados e pré-fabricados, quanto na aplicação do concreto in loco.

De acordo com a EFNZARC (2002), o concreto autoadensável pode ser caracterizado por três propriedades, a capacidade de enchimento (fluidez), a habilidade passante e a resistência à segregação, sendo que estes três requisitos devem ser atingidos simultaneamente. Esses atributos são definidos da seguinte forma por Tutikian e Dal Molin (2008), fluidez é a capacidade do CAA de fluir pela fôrma, preenchendo todos os espaços; habilidade passante é a capacidade de escoar pela fôrma, conseguindo passar por entre as armaduras de aço sem apresentar obstrução de fluxo ou segregação e, por fim, a resistência a segregação define a competência do CAA de se manter coeso, enquanto flui pela forma, passando ou não por obstáculos.

Antes de iniciar a dosagem do CAA, conforme Repette (2008), deve-se ter em mente alguns princípios básicos, como, a pasta de concreto deve envolver adequadamente os agregados sendo capaz de lubrificá-los e espaçá-los. Sendo assim, o atrito interno dos componentes da mistura não deve comprometer a capacidade de fluidez do concreto.

Além disso, a pasta deve ser viscosa o suficiente para manter os agregados em suspensão, a fim de evitar que esses segreguem pela ação da gravidade. Para isso, indica-se o uso de distribuições granulométricas contínuas, e pela necessidade de fluir por espaços pequenos, como entre as barras de armadura, limita-se o teor e as dimensões do agregado graúdo da mistura (REPETTE, 2008).

Portanto, comparando a dosagem do concreto convencional com a do autoadensável, tem-se, para o segundo, uma maior exigência da quantidade de material fino e menor volume de agregados, devido a necessidade de manutenção da estabilidade da mistura, o que provoca um aumento na resistência à segregação do concreto. Esse efeito também pode ser alcançado com o uso de aditivos promotores

de viscosidade. Além disso, para se atender a fluidez requerida, utilizam-se aditivos superplastificantes (MELO, 2005).

Segundo Lisboa (2004), inúmeras pesquisas vêm se desenvolvendo para conhecer melhor as propriedades do concreto autoadensável, bem como verificar sua aplicabilidade nos diversos elementos estruturais.

Seguindo esse contexto, para Tutikian e Pacheco (2012), à medida que as pesquisas foram se intensificando, vários procedimentos e recomendações para a dosagem do CAA foram publicados. Contudo, os métodos podem divergir entre si no que diz respeito aos critérios para definição da composição granular, sendo alguns destes métodos baseados em sequências de cálculos que definem os limites de cada material na mistura.

Mesmo com tantos estudos se fortalecendo nessa área, e com diversos métodos de dosagem eficazes que proporcionam CAA econômicos, como os propostos por Gomes (2002), Melo-Repette (2005) e Tutikian e Dal Molin (2007), o mercado ainda apresenta uma baixa demanda na utilização do concreto autoadensável, seja por seu custo teoricamente mais elevado ou, por receio de que as propriedades no estado endurecido sejam reduzidas, como o módulo de elasticidade. Entretanto, sabe-se que o CAA pode apresentar características diferentes no estado fresco, ao mesmo tempo que suas propriedades mecânicas e durabilidade podem igualar e até mesmo superar as dos concretos convencionais. (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

2.2 AÇO PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO

A normatização de barras de aço para utilização em concreto armado, no Brasil, data de 1967, com a intitulação Norma de Especificação (EB)3 – Condições de emprego das barras de aço destinadas a armar peças de concreto armado.

Atualmente, a NBR 7480 (ABNT, 2007) é a norma vigente, a qual especifica e regulamenta as características das barras e fios utilizados como armaduras nas estruturas de concreto. A norma classifica como barras os produtos que apresentam diâmetro nominal igual ou superior a 6,3 mm, que sejam obtidos exclusivamente por laminação a quente, sem nenhum processo de deformação mecânica realizado posteriormente, e, como fios os produtos de diâmetro igual ou inferior a 10,0 mm que podem ser obtidos a partir de fio-máquina por trefilação ou laminação a frio.

Segundo Araújo (2003 v.1), na nomenclatura usual de projeto não há diferenciação entre barras ou fios, sendo ambos designados como barras de armadura. Porém, o processo de fabricação destas tem influência em suas propriedades mecânicas, onde, as barras, obtidas apenas por laminação a quente, apresentam um patamar de escoamento no gráfico tensão-deformação, enquanto os fios não apresentam tal patamar, sendo fabricados a partir de deformação a frio.

A NBR 7480 (ABNT, 2007), ainda caracteriza as barras e fios de aço em função da resistência de escoamento, podendo as barras serem classificadas nas categorias CA-25 e CA-50, e os fios na categoria CA-60. Define-se o valor de tensão de escoamento característica do aço, f_{yk} , a partir de ensaios de tração realizados em um lote de corpos de prova, sendo indicado pelo número que segue o prefixo CA, em kN/cm^2 (ARAÚJO, 2003, v.1).

Para uma especificação completa do tipo da armadura, necessita-se caracterizar as barras de aço conforme sua capacidade de aderência junto ao concreto. Essa caracterização é realizada por meio do coeficiente de conformação superficial das barras, denominado “n” (FUSCO, 1995).

A NBR 7480 (ABNT, 2007) considera apenas dois tipos de conformação superficial das barras, conforme pode se verificar na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores mínimos de coeficiente superficial conforme o diâmetro

Categoria	Coeficiente de conformação superficial (η) mínimo	
	$\phi < 10 \text{ mm}$	$\phi \geq 10 \text{ mm}$
CA-25	1,0	1,0
CA-50	1,0	1,5
CA-60	1,0	1,5

Fonte: Adaptado pelo autor da Tabela B.3 da ABNT NBR 7480 (2007).

Para Fusco (1995), a classificação simplificada de apenas dois tipos de conformação, sendo $n=1$ para barras lisas e $n=1,5$ para barras de alta aderência, passa pela não dependência das diversas conformações superficiais adotadas pelos fabricantes, ou seja, as particularidades geométricas da superfície das barras de alta aderência disponíveis no mercado não influenciam na capacidade de aderência, desde que respeitadas as condições mínimas normatizadas.

A norma de projeto de estruturas em concreto armado NBR 6118 (ABNT, 2014), não faz menção às características específicas das barras e fios, apenas indica o tipo de superfície do aço utilizado como armadura, podendo ser lisos, entalhados ou providos de saliência ou mossas.

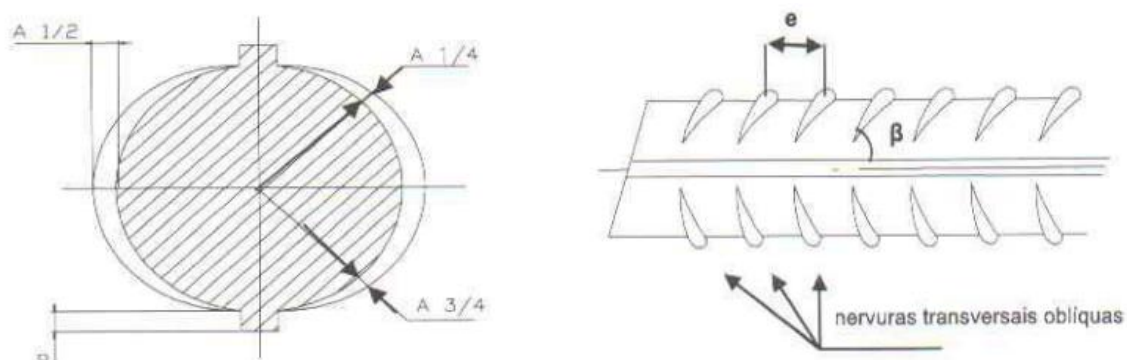
Por outro lado, a NBR 7480 (ABNT, 2007) indica o tipo de superfície para cada categoria de resistência do aço, estipulando as características geométricas.

No caso dos fios de categoria CA-60, sua configuração geométrica pode ser lisa, entalhada ou nervurada, desde que atenda aos valores de conformação superficial mínimo, apresentados anteriormente na Tabela 1. Quanto às barras CA-25, sua superfície deve ser obrigatoriamente lisa, adotando-se $n=1$. Já para as barras de categoria CA-50, deve haver a presença de nervuras, sendo detalhadas minuciosamente diversas especificações das características geométricas das nervuras:

- As nervuras transversais oblíquas devem formar um ângulo β , entre 45° e 75° com o eixo da barra;
- No caso das nervuras transversais não garantirem a impossibilidade de giro da barra dentro do concreto, as barras devem ser providas de pelo menos duas nervuras longitudinais contínuas e diametralmente opostas a fim de impedir o giro;
- A altura média das nervuras transversais deve ter pelo menos 4% do diâmetro nominal para barras de diâmetro iguais ou superiores a 10,0 mm. Quanto aos diâmetros inferiores a 10,0 mm, a altura deve representar pelo menos 2% do diâmetro nominal;
- A distância média entre nervuras transversais oblíquas deve ficar entre 50% e 80% do diâmetro nominal da barra;
- As nervuras transversais oblíquas devem ter projeção abrangendo no mínimo 85% do perímetro da seção transversal da barra.

A Figura 1 ilustra as especificações citadas. Demais configurações de nervuras são aceitáveis desde que cumpram os dois primeiros tópicos e aos limites mínimos de coeficiente de conformação superficial estabelecidos destacados anteriormente na Tabela 1 (ABNT NBR 7480, 2007).

Figura 1 – Configuração geométrica para barras nervuradas



b = altura da nervura longitudinal
 $A_{1/4}$ = altura da nervura a 1/4 do seu comprimento
 $A_{2/4}$ = altura da nervura a 2/4 do seu comprimento
 $A_{3/4}$ = altura da nervura a 3/4 do seu comprimento

β = ângulo entre o eixo da nervura oblíqua e o eixo da barra
 e = espaçamento entre nervuras

Fonte: Adaptado pelo autor da Figura A.1 da ABNT NBR 7480 (2007).

2.3 CONCRETO ARMADO COMO ELEMENTO ESTRUTURAL

O concreto armado caracteriza-se por ser um material compósito, constituído a partir da associação de concreto com barras de aço, as quais são convenientemente introduzidas no interior da peça de concreto devido à baixa resistência a tração da mesma. As barras de aço caracterizam-se por absorver os esforços à tração da estrutura e, por aumentar a capacidade de carga em peças comprimidas (ARAÚJO, 2003 v. 1).

2.3.1 Funcionamento estrutural

Segundo Fusco (1995), a evolução das regras para a técnica de armar as peças estruturais, as quais têm base no conhecimento da distribuição dos esforços, e a busca pelo conhecimento objetivo e real do comportamento das armaduras, fizeram com que o concreto armado deixasse de ser tratado como um material único e passasse a ser entendido como um material composto, por concreto e aço, sendo necessário respeitar a compatibilidade de funcionamento solidário entre ambos os materiais.

O concreto armado é o material que resulta da ação concomitante do aço e do concreto, sendo o concreto o material responsável por resistir à compressão, e o aço

usualmente apenas à tração. Por esse motivo, faz-se necessário que haja a transferência desses esforços entre os dois materiais, o que só é possível devido à existência da aderência (COSTA, 2012).

Araújo (2003, v.1) exemplifica a função da aderência entre os elementos comparando uma viga de concreto armado convencional com outra em que a armadura é separada do concreto por uma bainha. No primeiro caso, onde há aderência, a viga, ao escorregar, irá se deformar e apresentar uma distribuição linear das deformações normais, ou seja, a deformação da armadura será igual à da fibra de concreto situada no mesmo nível. Deste modo, a tensão de tração na armadura juntamente com a de compressão no concreto equilibra o momento solicitante. Quanto à segunda hipótese, quando carregada, a viga se deforma, porém, a barra de aço não é tensionada, por escorregar dentro da bainha. Sendo assim, a deformação específica da armadura é nula, considerando-se na prática apenas uma viga de concreto simples.

Para França (2004), a razão para a existência do concreto armado é fundamentada no trabalho conjunto entre ambos os materiais, aço e concreto. A ação solidária entre eles é a principal causa para a obtenção de um satisfatório desempenho estático.

A solidariedade existente entre o concreto e o aço impede que ocorra um escorregamento relativo entre a armadura e o concreto que a envolve, possibilitando as peculiaridades no comportamento do concreto armado (FUSCO, 1995).

Uma destas peculiaridades pode ser verificada em peças fletidas. Conforme Araújo (2003, v.1), quando as máximas tensões atingem o valor da resistência à tração do concreto é inevitável que se formem fissuras perpendiculares à direção desses esforços. Nestas seções fissuradas, presentes no denominado *Estágio II*, os esforços de tração passam a ser resistidos exclusivamente pelo aço. Entretanto, as demais seções da peça, as quais não apresentam fissuras, ainda encontram-se no chamado *Estágio I*, onde o concreto apresenta participação resistente aos esforços de tração.

2.3.2 Controle de qualidade

Nos dias de hoje, em grande parte do mundo, realiza-se o controle tecnológico do concreto armado com a finalidade de analisar a eficiência das estruturas, sendo avaliado, quase que exclusivamente, pela execução do ensaio de resistência à

compressão axial em corpos de prova cilíndricos de concreto, geralmente moldados durante o recebimento do concreto no canteiro de obras. O ensaio supracitado é realizado segundo NBR 5739 (ABNT, 2007), e requer equipamentos e mão de obra apropriados para realizá-lo. (JACINTHO *et. al.*, 2014).

Segundo Silva *et. al.* (2013), os recursos requeridos para a realização do ensaio não serão encontrados disponíveis diretamente no canteiro de obras, sendo necessária a contratação de laboratórios especializados no tipo de serviço desejado. Ainda assim, deve-se ter controle de diversos fatores para se obter um resultado confiável, seja por meio de moldagem, armazenamento, capeamento, entre outros, podendo qualquer alteração nos procedimentos padrões alterar significativamente os resultados.

Complementando o pensamento, Jacintho *et. al.* (2014) descreve que além de todos os inconvenientes e cuidados necessários para a obtenção de um valor de resistência, essa análise é feita em apenas um material, o concreto. Quando à resistência do aço, por ter um controle maior de fabricação, geralmente ignora-se. Assim como desconsidera-se a aderência entre ambos os materiais, a qual é uma condição básica para existência do concreto armado.

2.4 ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO

O estudo do fenômeno da aderência entre o aço e concreto tem por finalidade indicar o comportamento destes materiais de características distintas quando submetidos à transmissão de esforços. O aço caracteriza-se por ser um material que apresenta elevada ductilidade e resistência mecânica, enquanto o concreto tem comportamento frágil e possui baixa resistência à tração (FERNANDES, 2011).

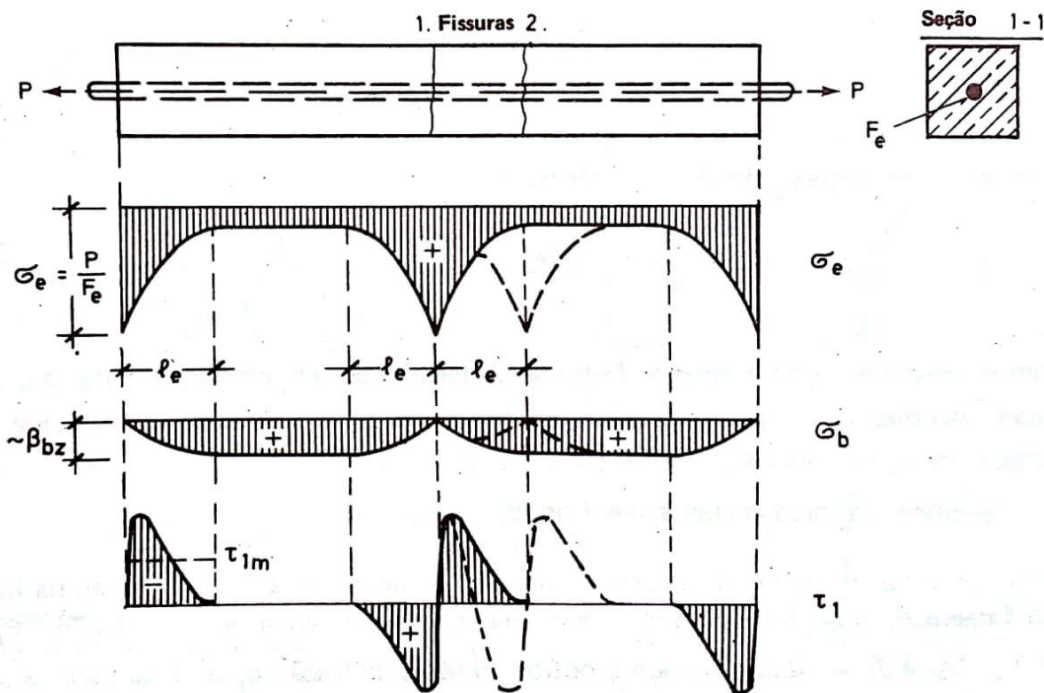
Para que uma estrutura de concreto armado seja capaz de resistir aos esforços solicitantes, é necessário que os diferentes materiais que compõem o concreto armado atuem em sinergia, sendo a aderência a característica fundamental deste trabalho conjunto (ISA; DE CEA; RENÓFIO, 2004).

A capacidade de uma estrutura de concreto armado resistir às cargas está intimamente relacionada com a aderência entre a barra e o concreto que a circunda, pelo fato de possível determinar, por meio do estudo dos fenômenos de aderência, os comprimentos de ancoragem e emendas da armadura (FERNANDES, 2011).

Segundo França (2004), através da aderência entre os materiais garante-se que as deformações específicas da armadura de aço e do concreto circunvizinho a ela sejam iguais quando estiverem sobre ação de cargas. Desta forma, o comportamento de aderência tem grande impacto em relação à capacidade de carga das estruturas em concreto armado.

Além disso, segundo Fernandes (2011), o fenômeno da aderência ainda tem função de prover rigidez às peças de concreto armado, uma vez que as transferências de tensão entre o concreto e a armadura tentem a controlar a fissuração nos casos de tensões de *Estágio II*. Nestes casos, conforme Leonhardt e Mönning (1977, v.1), com o acontecimento da fissura, a força de tração suportada pelo concreto é absorvida pelo aço, que no local da fissura suporta todo o esforço de tração. Neste momento, a aderência tem o efeito de controlar as variações de tensão, distribuindo essas alterações em curvas ao longo de um comprimento l_e , conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Redistribuição das tensões de tração no *Estágio II*



Fonte: Leonhardt e Mönning (1977).

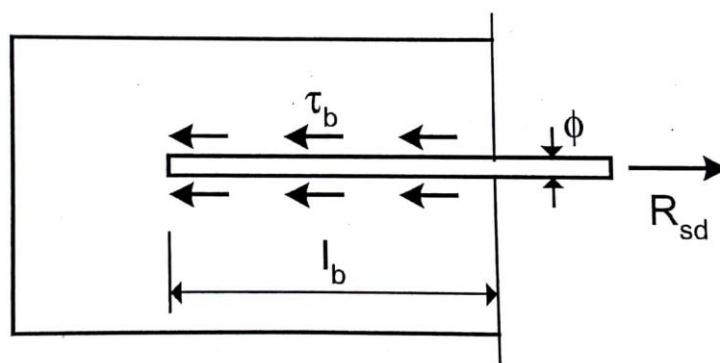
França (2004) cita que desde a década de 40, realizam-se estudos sobre os mecanismos do fenômeno da aderência entre o aço e concreto vem sendo, sejam através de ensaios experimentais como análises do comportamento conjunto dos

materiais, afim de compreender o real comportamento do fenômeno e permitir novos métodos de cálculo para melhor execução das estruturas.

2.4.1 Fenômenos de aderência

Segundo Araújo (2003 v.1), por meio da aderência entre existente entre os dois materiais, aço e concreto, formam-se tensões de cunho tangencial na interface desses elementos, sendo as forças de tração atuantes na barra transmitidas ao concreto ao longo do comprimento l_b , conforme indica a Figura 3. Ainda que estas tensões tangencias variem ao longo do comprimento da armadura, por simplificação de cálculo, basta considerar o valor médio desta tensão.

Figura 3 – Tensões tangenciais geradas pela aderência



Fonte: Araujo (2003 v.1).

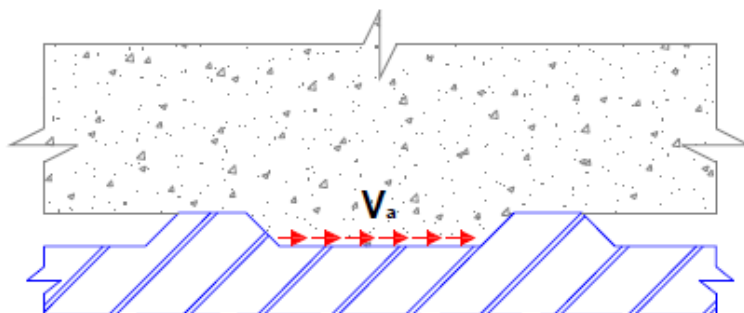
Embora seja conveniente adotar o valor médio das tensões de aderência, a transmissão dos esforços ocorre, na verdade, pela ação concomitante de três parcelas, sendo elas, aderência por adesão, por atrito e mecânica. Essa separação em frações de resistência considera-se, no entanto, meramente didática, visto que há uma impossibilidade de determinar cada parcela isoladamente devido à complexidade dos fenômenos envolvidos (REYES, 2009).

2.4.1.1 Aderência por adesão

Essa parcela acontece devido às ligações físico-químicas estabelecidas na interface dos materiais ao longo dos processos e reações de cura do cimento, presente no concreto, que tendem a mantê-los unidos (FUSCO, 1995).

Conforme exemplifica Reyes (2009), essa parcela de aderência verifica-se através da separação de um bloco concretado sobre uma superfície metálica, como ilustra a Figura 4, onde neste caso, haverá apenas uma ligação por adesão.

Figura 4 – Aderência por adesão



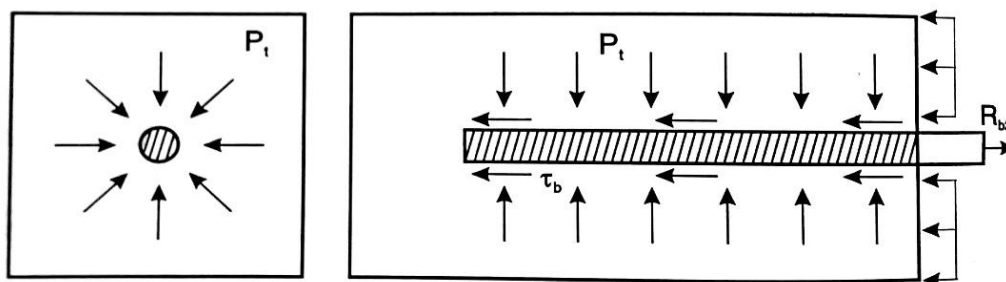
Fonte: Reyes (2009).

Segundo Araújo (2003, v.1), a ligação estabelecida entre aço e concreto, ao longo do processo de pega do cimento, promove um efeito de colagem entre os materiais, que se desfaz com facilidade para pequenos deslocamentos de barra. Sendo assim, essa parcela tem uma contribuição muito pequena para a resistência total de aderência.

2.4.1.2 Aderência por atrito

Percebe-se que a partir da realização do ensaio de arrancamento em uma barra parcialmente mergulhada no concreto, conforme Figura 5, ocorre um acréscimo de aderência devido a existência de forças de atrito. Verifica-se neste ensaio que a força necessária para arrancar a barra R_{b2} é significativamente maior do que os limites previstos para as forças de adesão (FUSCO, 1995).

Figura 5 – Aderência por atrito



Fonte: Fusco (1995).

Segundo Araújo (2003 v.1), a aderência decorrente das forças de atrito depende de dois fatores, a rugosidade superficial da barra de aço e as pressões transversais atuantes na mesma.

Essa parcela de resistência por atrito, segundo Fernandes (2011), encontra-se no concreto armado, devido à total imersão da barra de aço no concreto, o que favorece o seu enclausuramento, fazendo com que a força de atrito seja aumentada quando a barra tende a se movimentar após o rompimento da ligação por adesão.

A partir desse confinamento, surge uma condição fundamental para a existência das forças de atrito, como salienta Fusco (1995), as forças dependem de uma pressão transversal P_t exercida pelo concreto na barra, sendo essa pressão decorrente das deformações por retração do concreto, que se inibem na presença da barra.

Ainda se considerando uma situação mais específica, porém usual nas estruturas de concreto armado, pode se verificar o acréscimo dessa pressão nas regiões de apoios diretos de vigas, gerados por esforços externos de compressão (FUSCO, 1995).

2.4.1.3 Aderência mecânica

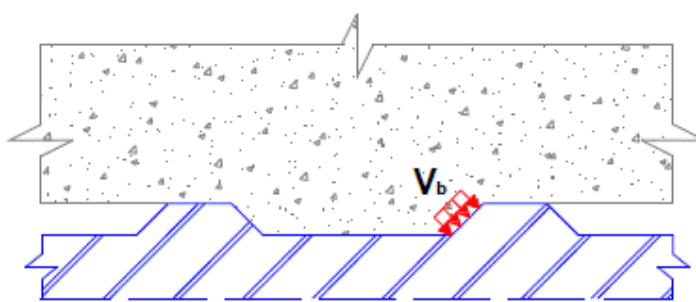
Obtém-se a terceira parcela devido à presença de saliências na superfície da barra, em especial nas barras chamadas de alta aderência, as quais possuem nervuras inseridas intencionalmente ao longo de sua superfície. Tais saliências têm a finalidade de apoio junto ao concreto (FUSCO, 1995).

Conforme Araújo (2003, v.1), a aderência mecânica em barras nervuradas acontece por meio do contato direto entre as saliências na superfície da barra e o

concreto, que funciona como pequenos consoles, sendo submetido a solicitações cortantes. Leonhardt e Mönning (1977, v.1) complementa que a maneira mais efetiva de promover essa ligação entre o aço e o concreto ocorre mediante à resistência ao corte.

Ao analisar a aderência com o uso de barras nervuradas, nota-se a dependência essencial da ação mecânica entre as saliências e o concreto, conforme ilustrado na Figura 6. Neste caso, considera-se o efeito químico de adesão muito pequeno, e a parcela de resistência por atrito, somente será relevante após o acontecimento de um escorregamento entre os materiais (FRANÇA, 2004).

Figura 6 – Ação mecânica entre nervuras e concreto



Fonte: Reyes (2009).

Mediante o funcionamento da aderência mecânica, a formação dos consoles de concreto restringem o deslizamento rápido da barra no interior do concreto, considerando-se o mecanismo de ligação mais efetivo e que permite a otimização do aproveitamento das altas resistências do aço (ROSSI, 2002).

A ligação entre aço e concreto, além de funcionar em escala macroscópica com as saliências da barra, pode ser considerada microscopicamente, através da tendência de encaixe entre os materiais nas ranhuras superficiais da barra (FERNANDES, 2011).

Portanto, a aderência mecânica verifica-se igualmente no caso de barras lisas, devido às irregularidades na superfície, inerentes aos processos de fabricação das mesmas. Nestes casos, as aderências por atrito e mecânica praticamente se confundem (FUSCO, 1995).

2.4.2 Fatores que influenciam a aderência

Definir um modelo simples e único que represente a aderência aço-concreto não considera-se possível devido inúmeros fatores ainda não estudados suficientemente, os quais têm influência no comportamento da aderência, alterando tanto a resistência quanto o mecanismo de ruptura (REYES, 2009).

Dentre os fatores que influenciam a aderência, destacam-se as características mecânicas do concreto, como resistência à compressão e à tração, a composição do concreto, o cobrimento e o espaçamento entre as armaduras, o diâmetro da barra, o estado de conservação superficial da barra, o tamanho e espaçamento das nervuras da barra, o tipo de cura da peça, a fluência, os efeitos de confinamento no concreto, a presença e quantidade de armadura de confinamento, a forma de carregamento sendo cíclico ou monotônico, a velocidade do carregamento, o revestimento da armadura, a posição da armadura em relação à concretagem, o comprimento de ancoragem, o adensamento e a temperatura (FERNANDES, 2000; REYES, 2009; FERNANDES, 2011; DUMET, 2003; FRANÇA, 2004).

2.4.2.1 Influência do concreto

Um dos fatores que influencia diretamente na eficiência da transmissão de esforços é a resistência do concreto, onde quanto maior a resistência mecânica, maior a aderência. Característica que ocorre devido ao engaste deste com a barra (FERNANDES, 2011).

Conforme interpretação dos resultados de G. Rehm, Leonhardt e Mönnig (1977, v.1) afirmam a existência de uma relação linear bastante precisa entre a tensão de aderência do aço-concreto e a resistência cúbica de compressão do concreto. Devido essa relação, Ribeiro (1985) constata que a influência da idade de carga sobre a aderência ocorre da mesma forma com que afeta a resistência à compressão ou à tração.

Segundo França (2004), fica estabelecida a regra de que os diversos concretos que apresentem mesma resistência à compressão e à tração, apresentarão comportamentos de aderência praticamente iguais, mesmo que existam estudos que indiquem algumas variações na resistência de aderência, conforme a composição do traço. Um destes estudos, realizado por Martin e Noakowski (1981, *apud* França,

2004), constata uma melhora no comportamento da aderência em traços com baixa quantidade de água e com utilização de agregados graúdos com diâmetros maiores.

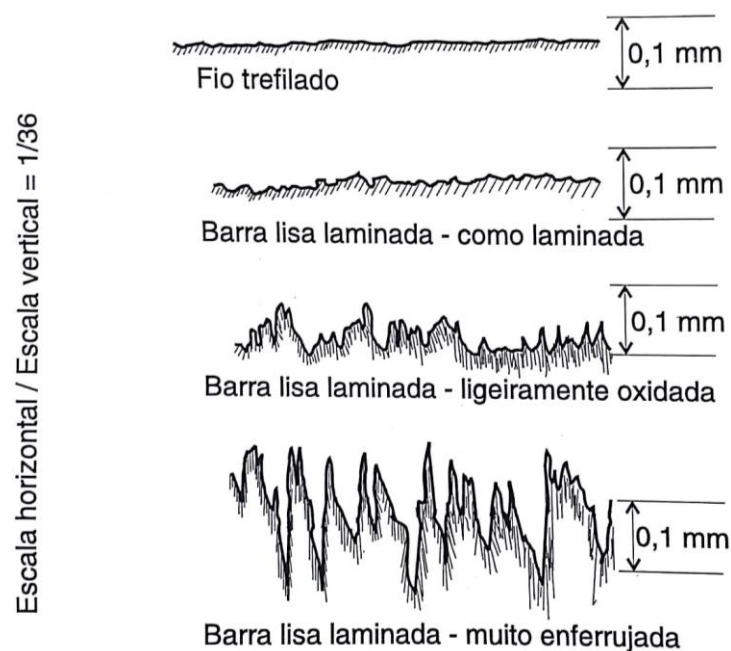
Indo de encontro com o pensamento apresentado por Mauline e Astrova (1965, *apud* Ribeiro, 1985) que afirmam que a diminuição da relação água/cimento e da quantidade de agregado miúdo, em conjunto com o aumento da quantidade do agregado graúdo, são favoráveis ao comportamento na aderência.

2.4.2.2 Influência da barra de aço

Considera-se a rugosidade da barra um fator de alta relevância, pois quanto mais rugosa sua superfície, maior será o seu engaste ao concreto. Sendo que, ao ocorrer sua solitação, a barra continuará a produzir esforços no concreto, mesmo após o comprometimento da ligação por adesão (FERNANDES, 2011).

Nota-se uma grande variedade nas rugosidades da barra em função do seu grau de conservação, como pode ser constatado na Figura 7. Desta forma, o aço recém laminado apresenta uma superfície mais lisa quando em comparação a uma enferrujada, sendo caracterizada pela alta rugosidade que produz um denteamento da superfície, promovendo uma aderência mecânica (LEONHARDT; MÖNNIG, 1977, v.1).

Figura 7 – Rugosidade do aço em função de sua fabricação e conservação



Fonte: Fusco (1995).

Segundo Dumet (2003), a condição superficial da barra é um fator importante frente à aderência. Nos casos de barras com a presença de ferrugem, por serem mais rugosas, observa-se uma melhora em relação à aderência. Entretanto, considera-se um parâmetro de difícil quantificação e, apesar da melhora, não recomenda-se o uso intencional de barras oxidadas.

Com relação ao diâmetro da barra, Leonhardt e Mönning (1977, v.1) afirmam que este fator representa pouca influência sobre a tensão de aderência. Contudo, indica que barras de menor diâmetro representam-se mais favoráveis ao uso. Exemplificando, ao reduzir o diâmetro da barra pela metade, esta poderá ser utilizada com o dobro da tensão, caso o comprimento de ancoragem seja mantido.

Para obter-se um melhor desempenho de aderência, Reyes (2009) recomenda a utilização de barras de menor diâmetro em maior quantidade, ao invés de barras de maior diâmetro em menor quantidade, permanecendo constante as distâncias entre as barras.

2.4.2.3 Influência da posição da barra

A posição e a distância da armadura em relação ao fundo da forma durante a concretagem de uma peça, consideram-se aspectos essenciais para a qualidade da aderência (LEONHARDT; MÖNNIG, 1977, v.1).

Conforme Reyes (2009), para obtenção de uma tensão de aderência otimizada, é vital que o concreto circunvizinho à barra tenha uma composição adequada, o que torna-se difícil de garantir em condições de canteiro de obra.

Devido à segregação que ocorre no concreto em seu estado fresco, pode-se ocorrer acúmulos de água sob as barras, o que irá alterar significativamente a resistência de aderência (LEONHARDT; MÖNNIG, 1977, v.1).

Com mesmo pensamento, França (2004) afirma que este acúmulo de água sob as barras posteriormente é absorvido pelo concreto endurecido, ocasionando espaços vazios ou altamente porosos na face inferior da barra, o que compromete a zona de transição entre aço e concreto.

As barras dispostas na horizontal na parte superior da fôrma apresentam resultados inferiores aos das inseridas próximas ao fundo. Isso ocorre pelo fato das barras inferiores encontrarem-se em uma zona onde o concreto apresenta melhor compactação. (RIBEIRO, 1985).

Ainda como agravante, conforme citado por Reyes (2009), o concreto situado mais próximo ao topo, devido à exsudação, tende a apresentar uma relação água/cimento mais elevada, proporcionando a redução da resistência à tração do concreto nessa zona.

2.4.2.4 Cobrimento e espaçamento entre barras

O cobrimento e o espaçamento entre as barras relacionam-se intimamente ao tipo de falha de aderência que se observa nos ensaios laboratoriais. No caso de um cobrimento pequeno, a ocorrência de falha por tensão de ruptura irá reduzir a capacidade de aderência em relação ao arrancamento ou cisalhamento (REYES, 2009).

Complementando, França (2004) afirma que medidas como o aumento do cobrimento e da qualidade do concreto, melhoram a resistência última de aderência. Assim como o aumento da quantidade de armaduras transversais, que promovem um acréscimo de tensão, além de tornar a ruptura menos brusca.

De acordo com Caetano (2008), quanto maior o cobrimento e o espaçamento entre as barras de aço, maior é o grau de confinamento, e por isso, a tensão de aderência se eleva.

2.5 ANCORAGEM DE ARMADURAS

Como condição geral prescrita na NBR 6118 (ABNT, 2014), as barras que compõem as armaduras devem ser ancoradas de forma com que as forças atuantes sobre elas sejam completamente transmitidas ao concreto, independentemente de serem providas de aderência, dispositivos mecânicos ou a combinação de ambos.

Entre as formas de promover-se a ancoragem de barras de armadura em estruturas de concreto, Araújo (2003 v.1) aponta que a ancoragem por aderência, por ser mais econômica, sempre será utilizada quando se dispõem do comprimento necessário para realizá-la. Do contrário, podem ser utilizados dispositivos especiais, como placas de ancoragem.

2.5.1 Prerrogativas da NBR 6118 para ancoragem por aderência

A ancoragem por aderência verifica-se, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), quando a ancoragem dos esforços é realizada mediante comprimentos retos ou com grande raio de curvatura, com ou sem presença de ganchos. Nestes casos, ao longo do comprimento de ancoragem devem existir armaduras transversais a fim de promover o confinamento da ancoragem, com exceção de regiões entre apoios diretos e quando o cobrimento e o espaçamento entre as barras de ancoragem forem maior ou igual a 3 vezes o diâmetro nominal da barra.

2.5.1.1 Valores das resistências de aderência

Para obter-se resultados suficientemente seguros, o cálculo de comprimentos de ancoragem retos deve ser função das resistências de aderência, onde admite-se que a tensão de aderência ao longo de todo o comprimento é constante e igual a f_{bd} (FUSCO, 1995).

Portanto, inicialmente a NBR 6118 (ABNT, 2014) especifica o cálculo da resistência de aderência entre armadura e concreto, cujo resultado servirá de base para o cálculo de comprimentos de ancoragem. O item 9.3.2 da norma supracitada, especifica o valor nominal de resistência à aderência, de armaduras passivas, segundo a Equação 1.

Equação 1 – Cálculo da resistência de aderência

$$f_{bd} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times f_{ctd}$$

Onde:

f_{bd} = resistência de aderência de cálculo da armadura passiva;

f_{ctd} = resistência à tração de cálculo do concreto;

η_1, η_2, η_3 = coeficientes para cálculo de tensão de aderência da armadura passiva.

A variável f_{ctd} , utilizada na equação é definida pela NBR 6118 (ABNT, 2014) como resistência à tração de cálculo do concreto, e depende do valor da resistência à

tração característica inferior, $f_{ctk,inf}$, que por sua vez varia conforme a resistência à compressão característica do concreto, f_{ck} .

Sendo assim, utiliza-se a Equação 2 para definir o valor de f_{ctd} .

Equação 2 – Cálculo da resistência à tração de cálculo do concreto

$$f_{ctd} = 0,21 \times \frac{f_{ck}^{\frac{2}{3}}}{\gamma_c}$$

Onde:

f_{ctd} = resistência à tração de cálculo do concreto;

f_{ck} = resistência à compressão característica do concreto;

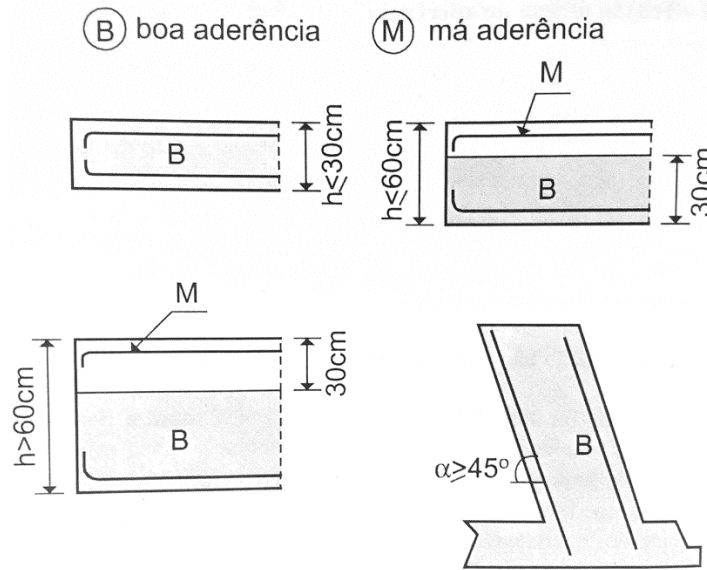
γ_c = um coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

Na equação que define o valor de f_{bd} , ainda são apresentados três parâmetros, η_1 , η_2 e η_3 , os quais variam, respectivamente, conforme a conformação superficial da barra, a posição da armadura na peça e o diâmetro da barra, sendo seus valores especificados pela NBR 6118 (ABNT, 2014) como:

- Coeficiente de aderência conforme a configuração geométrica da superfície da barra (η_1): quando utilizadas barras lisas, emprega-se o valor 1,0; para barras entalhadas, 1,4 e, para barras do tipo nervurada, 2,25.
- Coeficiente de aderência conforme a posição da barra durante a concretagem (η_2): quando a barra encontra-se em situação de boa aderência, que consistem nos seguintes posicionamentos das barras: inclinadas a mais de 45° com relação à horizontal, localizadas a no máximo 30 cm acima da face inferior de elementos com altura, $h < 60$ cm e localizadas a no mínimo 30 cm abaixo da face superior de elementos com $h \geq 60$ cm, utiliza-se o valor 1,0. Quanto às situações de má aderência, na qual se enquadram todos os trechos de barra que não se enquadram nas posições de boa aderência, utiliza-se o valor 0,7.

As situações de boa e má aderência são exemplificadas Figura 8 abaixo:

Figura 8 – Situações de boa e má aderência



Fonte: Araújo (2003, v.1).

- Coeficiente de aderência conforme o diâmetro da barra (η_3): para barras com diâmetro nominal menor ou igual a 32 mm, utiliza-se o valor 1,0. Por outro lado, para diâmetros maiores do que 32 mm, o coeficiente será determinado pela Equação 3.

Equação 3 – Cálculo do coeficiente η_3

$$\eta_3 = \frac{132 - \phi}{100}$$

Onde:

η_3 = coeficiente para cálculo de tensão de aderência da armadura passiva;

ϕ = diâmetro nominal da barra [mm].

2.5.1.2 Ancoragem de armaduras passivas por prolongamento retilíneo

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), as barras tracionadas podem ser ancoradas ao longo de um comprimento retilíneo ou com grande raio de curvatura, desde que se adequem as seguintes condições:

- Para barras lisas, devem obrigatoriamente conter ganchos;
- Para barras onde há alternância de esforços de tração e compressão, não devem conter ganchos;

- c) Nos demais casos, podem ou não conter ganchos, não sendo recomendado o gancho para barras ou feixes de barra com $\phi > 32$ mm.

2.5.1.3 Comprimento de ancoragem

A NBR 6118 (ABNT, 2014), estipula dois comprimentos de ancoragem, o básico e, o necessário. Sendo o comprimento de ancoragem básico determinado pela distância retilínea necessária para ancorar a força limite de cálculo da barra de aço, admitindo-se que ao longo desse comprimento a resistência de aderência é uniforme e equivale a f_{bd} . Desta forma, o comprimento de ancoragem básico é obtido através da Equação 4.

Equação 4 – Cálculo do comprimento básico de ancoragem

$$l_b = \frac{\phi}{4} \times \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \geq 25\phi$$

Onde:

l_b = comprimento de ancoragem básico;

ϕ = diâmetro nominal da barra;

f_{yd} = resistência de cálculo do aço;

f_{bd} = resistência de aderência de cálculo da armadura passiva.

De acordo com Araújo (2003 v.1), esse comprimento pode ser reduzido quando a área de aço efetivamente utilizada na peça de concreto for superior à área exigida no cálculo, sendo nesse caso, a tensão atuante na armadura inferior a f_{yd} .

Quanto ao comprimento de ancoragem necessário, considera-se a redução do comprimento em relação a tensão reduzida atuante na armadura através da relação da área calculada sobre a área efetiva. Além de considerar a presença de ganchos ou barras transversais soldadas. A seguir, representa-se a Equação 5, estipulada pela NBR 6118 (2014) para realização do cálculo.

Equação 5 – Cálculo do comprimento de ancoragem necessário

$$l_{b,nec} = \alpha \times l_b \times \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \geq l_{b,mín}$$

Onde:

$l_{b,nec}$ = comprimento de ancoragem necessário;

α = coeficiente para cálculo de comprimento de ancoragem;

l_b = comprimento de ancoragem básico;

$A_{s,calc}$ = área de aço calculada;

$A_{s,ef}$ = área de aço efetiva;

$l_{b,mín}$ = comprimento mínimo de ancoragem.

A norma supracitada estipula os valores de α e suas respectivas condições, sendo eles:

- a) = 1,0 quando a barra for sem gancho;
- b) = 0,7 quando a barra for tracionada com gancho, com cobrimento no plano normal ao gancho maior ou igual a 3ϕ ;
- c) = 0,7 quando houver barras transversais soldadas;
- d) = 0,5 quando houver as condições conjuntas dos itens b e c.

Quanto ao $l_{b,mín}$, especifica-se, pela norma anteriormente citada, como sendo o maior valor entre $0,3l_b$, 10ϕ e 100 mm.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresentará os procedimentos de confecção e condição de amostras, o desenvolvimento e escolha dos traços utilizados no estudo, as variáveis analisadas e os métodos de ensaio, com suas respectivas normas.

3.1 ESTRUTURAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A pesquisa elaborada neste trabalho se deu por meio da realização de ensaios laboratoriais, sucedidos pela análise dos resultados obtidos. Inicialmente foi escolhido o formato do ensaio e a normativa correspondente. Baseado nisso, definiu-se as variáveis do estudo e dimensões dos corpos de prova. Previamente à confecção dos corpos de prova, foram caracterizados os materiais utilizados e definiu-se os traços de concreto utilizados a partir de traços piloto.

Sendo assim o programa experimental foi planejado e dividido em seis etapas, com o objetivo avaliar a aderência entre aço e concreto controlando as variáveis em estudo. A estruturação das etapas é destacada na Tabela 2.

Tabela 2 – Estruturação do programa experimental

Etapa	Delimitação
1 ^a	Definição do ensaio e das variáveis
2 ^a	Caracterização dos materiais utilizados
3 ^a	Escolha dos traços de concreto
4 ^a	Confecção, cura e corte das amostras
5 ^a	Realização do ensaio de arrancamento e compressão axial
6 ^a	Extração de amostras e ensaio de absorção

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na primeira etapa foi escolhido o ensaio do tipo *pull out*, utilizado para avaliar a aderência entre aço e concreto, e definida uma normativa a ser seguida. A partir disso, estabeleceu-se as variáveis do estudo e as dimensões dos corpos de prova, possibilitando uma estimativa de quantidade de material necessário para realizar o estudo.

A segunda etapa limitou-se a obtenção dos materiais necessários para confecção do concreto e a realização dos ensaios de caracterização física e granulométrica dos agregados.

Na terceira etapa foram definidos traços de concreto, independentes dos corpos de prova de arrancamento, sendo a resistência característica dos traços definida a partir de ensaios de compressão axial. A partir deste parâmetro, definiu-se os traços utilizados na próxima etapa do estudo.

A quarta etapa, com os traços e as dimensões definidos, consistiu no desenvolvimento das fôrmas, posicionamento das barras e moldagem dos corpos de prova de arrancamento e de compressão axial. Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos em cura controlada e, antes do início dos ensaios, foi realizado o corte das amostras que necessitavam.

Na quinta etapa foram realizados os ensaios de arrancamento e compressão axial, com a idade de 7(+1) dias, para determinar as tensões de aderência entre a barra e o concreto e, a resistência do concreto, respectivamente.

Para finalizar, a sexta etapa consistiu na extração de prismas menores, retirados de amostras ensaiadas ao arrancamento, sendo utilizados para a realização do ensaio de absorção por capilaridade.

3.2 DEFINIÇÃO DO ENSAIO E DAS VARIÁVEIS

Devido à grande variedade de ensaios existentes para avaliar a aderência, foi necessário definir o ensaio mais apropriado para o estudo. Dentre os ensaios estudados, destacaram-se os do tipo *pull-out* e de tirantes, pelo fato da viabilidade de execução destes.

3.2.1 Definição do ensaio e normativa

Dentre os dois ensaios considerados, optou-se pelo *pull-out test*, devido à natureza direta de seus resultados, sendo a força máxima facilmente convertida em tensão máxima de aderência.

Existem algumas normativas internacionais que definem os procedimentos deste ensaio para barras de aço, como por exemplo a ASTM C234 (1991) e a RILEM-CEB RC6 (1983). Entretanto, devido à falta de acesso a estas normativas, foram seguidos os procedimentos recomendados pela ACI 440.3R (2004), os quais assemelham-se aos prescritos pelas normativas supracitadas.

3.2.2 Variáveis

Neste programa experimental, busca-se analisar a influência do adensamento nos resultados de tensão aderente entre aço e concreto. Portanto, foram definidas como variáveis o próprio adensamento e a posição da barra em relação à concretagem.

Sendo assim, como métodos de adensamento optaram-se pelo manual, mecânico e auto compactação, por meio do concreto autoadensável.

Seguindo parâmetros da NBR 6118 (ABNT, 2014), para o ensaio de arrancamento, definiu-se a variável da posição da barra, onde uma barra de aço se encontre em posição de boa e outra em condição de má aderência, com relação ao exemplar de concreto. Para isso, cada exemplar moldado foi constituído por um par de corpos de prova compondo a variável de posição da barra, onde um corpo de prova se encontra em cima do outro, sendo moldados na mesma fôrma. Desta forma, tentou-se isolar as demais variáveis que poderiam interferir nos resultados.

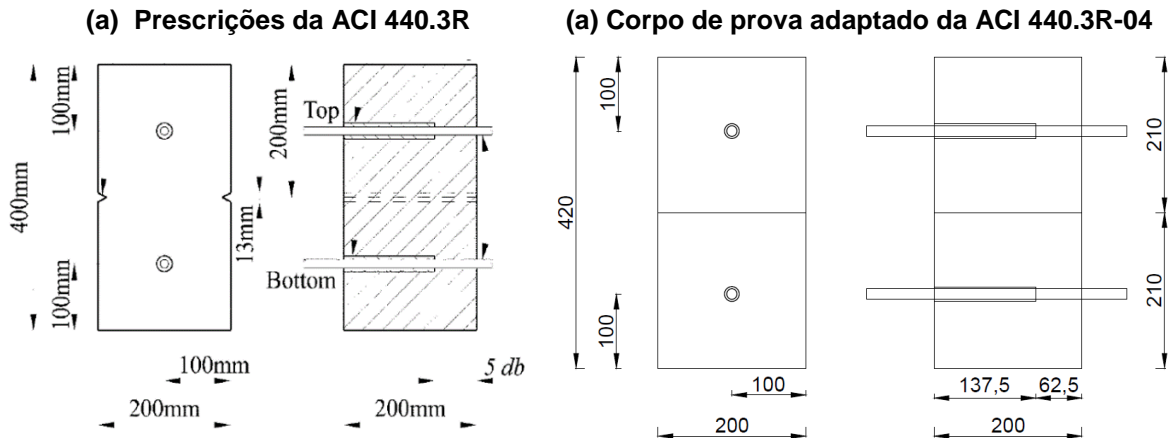
Os traços de concreto, tanto convencional como autoadensável, foram previamente dosados e ensaiados para atingirem resistências características próximas a 25 MPa, isolando ao máximo a variável da resistência à compressão.

Como o diâmetro da barra de aço não encontra-se entre as variáveis do estudo, definiu-se o diâmetro nominal de 12,5 mm para todas as amostras. As 30 barras de aço utilizadas apresentavam-se em bom estado de conservação. Contudo, ainda receberam uma limpeza superficial com escova de aço para reduzir ao máximo a influência do grau de conservação das mesmas.

3.2.3 Dimensões dos corpos de prova

As dimensões dos corpos de prova foram definidas tomando como base as recomendações da ACI 440.3R (2004) e a variável da posição da barra. Desse modo, foi feita uma adaptação do prescrito pela normativa, com o intuito de manter a barra superior inteiramente na zona de má aderência, definida pela NBR 6118 (ABNT, 2014), neste caso, como sendo a zona cujo início ocorre 30 cm acima da face inferior do exemplar. A Figura 9 representa as dimensões indicadas pela norma (a) e as adotadas no estudo (b).

Figura 9 – Dimensões dos exemplares do ensaio de arrancamento



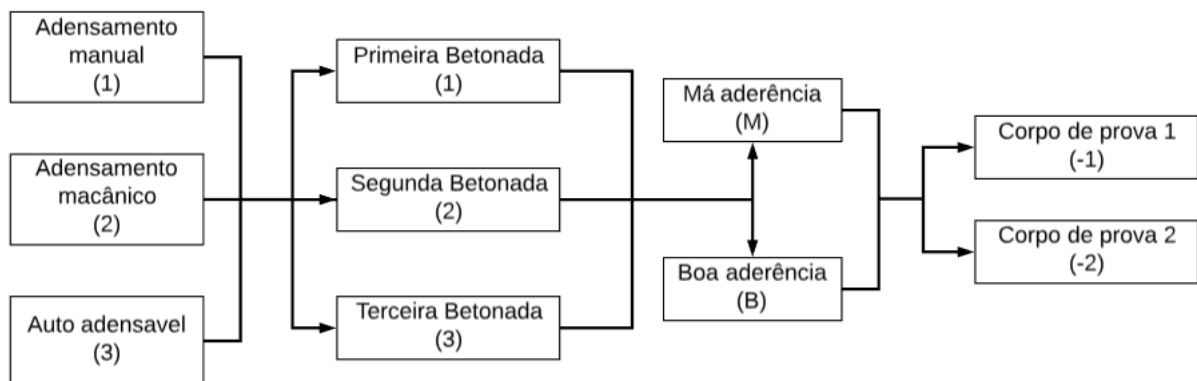
Fonte: (a) adaptado pelo autor da ACI 440.3R (2004); (b) elaborado pelo autor

Com a utilização de barras de diâmetro nominal igual a 12,5 mm, definiu-se, conforme a ACI 440.3R (2004), o comprimento aderente da barra em 62,5 mm, valor que representa cinco vezes o diâmetro utilizado. Com relação ao comprimento não aderente, foi obtido pela subtração da dimensão do corpo de prova pelo comprimento aderente, resultando em 137,5 mm.

Devido ao grande volume necessário para moldar cada dupla de corpos de prova, foi necessário dividir a moldagem dos mesmos em três betonadas, aumentando a possibilidade de pequenas variações na composição do concreto e, conseqüentemente, nas suas propriedades mecânicas.

Portanto, os corpos de prova foram nomeados levando em consideração as duas variáveis principais e a possível variação entre as betonadas, conforme o fluxograma demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma de nomeação dos corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Devido a dependência do concreto e seus componentes, utilizaram-se exatamente os mesmos materiais para o desenvolvimento dos traços.

Os materiais selecionados para o estudo foram facilmente encontrados, sendo bastante utilizados na indústria da construção civil, constituindo-se de: brita, areia, cimento, cinza, água e aditivos.

Os agregados gráudo e miúdo foram caracterizados conforme as indicações normativas das NBR NM 53 e 52 (ABNT,2009), respectivamente, e NBR NM 248 (ABNT, 2003).

3.3.1 Materiais aglomerantes

Os dois materiais aglomerantes utilizados no estudo foram o cimento do tipo CP-II-F 40 da marca Itambé que apresenta densidade de $3,09 \text{ kg/dm}^3$, e a cinza leve com características pozolânicas, procedente da Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica - Eletrobrás CGTEE, de Candiota, com densidade de $2,30 \text{ kg/dm}^3$.

3.3.2 Agregados

Como agregado gráudo foi utilizada brita 0, de massa específica igual a $2,95 \text{ g/cm}^3$. Quanto aos agregados miúdos, selecionaram-se duas areias naturais, uma média e outra fina, com massa específica igual a $2,60 \text{ g/cm}^3$ e $2,63 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

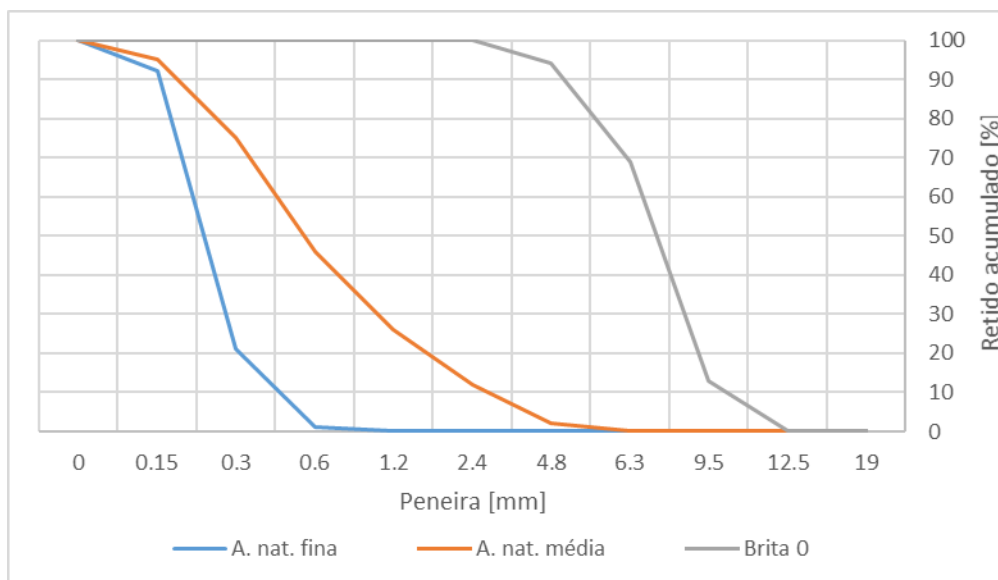
Apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de granulometria para os três agregados supracitados na Tabela 3. Assim como as curvas granulométricas demonstradas no Gráfico 1.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de caracterização granulométrica

Peneira [mm]	% Retida			% Retida acumulada		
	A. nat. fina	A. nat. média	Brita 0	A. nat. fina	A. nat. média	Brita 0
19	0	0	0	0	0	0
12.5	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	13	0	0	13
6.3	0	0	56	0	0	69
4.8	0	2	25	0	2	94
2.4	0	10	6	0	12	100
1.2	0	14	0	0	26	100
0.6	1	20	0	1	46	100
0.3	20	29	0	21	75	100
0.15	71	20	0	92	95	100
Fundo	8	5	0	100	100	100
Módulo de finura				1.14	2.56	6.04
Dimensão máxima característica [mm]				0.6	4.8	12.5
Material fino (< 0.3 mm) [%]				79	25	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 1 – Curva granulométrica dos agregados



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3 Aditivos químicos

Neste estudo foram utilizados dois aditivos químicos, sendo o FK 120 da MC-Bauchemie um plastificante multifuncional, com densidade de 1,2 g/cm³, e o

PowerFlow 1180 um superplastificante a base de policarboxilatos, também da marca MC-Bauchemie, com densidade de 1,09 g/cm³.

3.4 ESCOLHA DOS TRAÇOS UTILIZADOS

Em parceria com um profissional da área foram definidos alguns traços de concreto com o intuito de atingir resistências próximas a 25 MPa aos sete dias, tanto convencionais como autoadensáveis, tendo como objetivo a escolha de um traço de cada tipologia, com maior proximidade de resistência característica.

3.4.1 Definição dos traços piloto

Para obter uma aproximação de resistência, foram compostos os seguintes traços, calculados em massa para confecção de 1m³, sendo destacados na Tabela 4. Dos cinco traços definidos, três correspondem a concretos convencionais (CC) e os demais, a concretos autoadensáveis (CAA).

Tabela 4 – Apresentação dos traços iniciais

Família	Cinza [kg]	Cimento [kg]	Areia [kg]	Areia fina [kg]	Brita 0 [kg]	Água [kg]	Polif. [kg]	Policarb. [kg]
CC 1	43	245	908	0	1019	170	1.59	0
CC 2	47	265	885	0	1020	170	1.72	0
CC 3	50	285	863	0	1021	170	1.85	0
CAA 1	201	229	461	307	942	200	0.4	0.4
CAA 2	181	249	461	307	942	200	1.96	1.96

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os CCs, as estratégias adotadas para que os traços apresentassem resistências variadas foram, a conservação do teor de argamassa em 54 % e da quantidade de água em 170 L/m³ de concreto, variando a quantidade de aglomerante. Para os CAAs, adotaram-se as mesmas estratégias, sendo o teor de argamassa mantido em 56% e a quantia de água em 200 L/m³ de concreto, contando ainda com a preservação da massa de aglomerantes entre os traços, variando-se apenas a relação cimento/cinza.

3.4.2 Características dos traços piloto e escolha dos traços

Com os traços pré-definidos, iniciam-se as misturas, sendo necessária a realização de alguns ajustes na hora da moldagem, com relação a quantidade de água e aditivos. Assim, foram confeccionados três corpos de prova cilíndricos para cada traço, com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, seguindo as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2016) quanto à moldagem e cura.

Os traços tiveram suas propriedades no estado fresco verificadas, conforme a tipologia do traço. Com relação aos traços de CCs foram realizados ensaios de abatimento de tronco de cone conforme especificações da NBR NM 67 (ABNT, 1998). Quanto aos CAAs, as características no estado fresco foram definidas conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2017) por meio de ensaio de aceitação de lote e, espalhamento e anel J segundo as recomendações das NBR 15823-2 e NBR 15823-3 (ABNT, 2017), respectivamente.

Através da Tabela 5 demonstram-se os resultados dos ensaios no estado fresco.

Tabela 5 – Resultados de trabalhabilidade do concreto

Traço	Abatimento [mm]	
CC1	145	
CC2	150	
CC3	150	
	Espalhamento [mm]	PJ [mm]
CAA1	620	PJ1
CAA2	630	PJ1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os corpos de prova foram ensaiados a compressão com idade de 7 dias, de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 2018). O controle dimensional e os resultados dos rompimentos foram destacados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados de compressão dos traços piloto

CP	ϕ_{med} (mm)	Altura (mm)	F MÁX (kN)	σ MÁX (MPa)
CC1-1	99.9	197	164.3	21.0
CC1-2	100.1	196	163.8	20.8
CC1-3	100	195	165.6	21.1
CC2-1	100.2	199	182.7	23.2
CC2-2	100.15	198	187.4	23.8
CC2-3	100.05	196	191.3	24.3
CC3-1	100.45	195	208.0	26.2
CC3-2	100.35	197	208.5	26.4
CC3-3	100.8	195	253.1	31.7
CAA1-1	99.9	196	171.9	21.9
CAA1-2	100.4	199	175.5	22.2
CAA1-3	100.85	195	173.0	21.7
CAA2-1	99.65	198	188.1	24.1
CAA2-2	100.3	198	183.3	23.2
CAA2-3	100.25	196	184.1	23.3

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos resultados obtidos na Tabela 6, selecionaram-se os traços CC2 e CAA2 para serem utilizados na confecção dos corpos de prova, devido à proximidade de resistência entre os dois, sendo inclusive ambos próximos a resistência desejada de 25 MPa.

3.5 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para obter os corpos de prova destinados aos ensaios de arrancamento, primeiramente, foram confeccionadas as fôrmas de madeira e, em seguida, as barras de aço foram preparadas para garantir o correto comprimento aderente. Tendo como sequência a moldagem, cura das massas de concreto e o corte.

A moldagem e cura dos corpos de prova destinados aos ensaios de compressão foram realizados concomitantemente aos de arrancamento, para obter-se o controle do concreto de cada betonada.

3.5.1 Montagem das fôrmas e preparação das barras

Cada fôrma foi composta de quatro paredes e uma tampa de fundo, sendo duas paredes opostas e paralelas providas de furos para possibilitar o transpasse das barras de aço pelo corpo de prova, conforme demonstrado anteriormente na

Figura 9 (b). As fôrmas foram confeccionadas com paredes e fundo de compensado naval plastificado de 14 mm, sendo a união realizada com pregos e o reforço feito com arames para garantir a integridade durante seu preenchimento.

Após a montagem das fôrmas, as barras de aço foram preparadas para serem posicionadas junto à forma. Realizou-se em cada barra uma limpeza superficial com a utilização de uma escova de aço, a fim de remover a ferrugem e/ou quaisquer impurezas.

Para isolar o comprimento não aderente, utilizaram-se trechos de mangueira de silicone com diâmetro interno de 16 mm. Para evitar que o concreto penetrasse no tubo, enrolou-se fita crepe na barra, de forma a vedar os espaços entre ela e a mangueira. As Figura 11 e Figura 12 destacam, respectivamente, o processo de preparação das barras e o posicionamento das mesma junto a fôrma.

Figura 11 – Preparação das barras de aço



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Posicionamento da barra junto à forma

(a) Vista externa



(b) Vista interna



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5.2 Moldagem dos corpos de prova

As moldagens foram separadas em três séries, onde cada uma foi realizada em uma data específica, sendo aplicado um tipo de adensamento a cada dia. A série 1 corresponde ao adensamento manual, a 2 ao adensamento mecânico e a 3 não necessitou de adensamento pois foi utilizando concreto autoadensável.

Conforme as variáveis definidas para o programa experimental e as prescrições descritas pela ACI 440.3R (2004), foi necessária a confecção de 15 exemplares de dimensões 20x20x42 cm, correspondendo 5 corpos de prova para cada combinação de adensamento e posição da barra, sendo confeccionados no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos, por meio da utilização de betoneira de eixo inclinado para a mistura do concreto. Ao final da moldagem, os corpos de prova foram cortados ao meio, totalizando 5 amostras de boa e 5 amostras de má aderência.

Devido ao elevado volume de concreto necessário e à limitação de produção do equipamento, foi necessário realizar três betonadas para atingir a moldagem dos

cinco exemplares de cada série. Para a primeira e segunda betonada foram moldados dois exemplares e três corpos de prova cilíndricos, enquanto para a terceira, apenas um exemplar e três testemunhos de resistência.

A partir da escolha dos traços CC2 e CAA2, realizou-se o quantitativo de materiais necessários para executar 48 litros de concreto, volume necessário para executar dois exemplares e três corpos de prova cilíndricos. Este quantitativo levou em consideração os ajustes realizados na etapa de escolha dos traços, sendo destacado na Tabela 7.

Tabela 7 – Quantitativo de materiais para moldagem

Concreto	Volume [L]	Cinza [kg]	Cimento [kg]	Areia [kg]	Areia fina [kg]	Brita 0 [kg]	Água [kg]	Polifunc. [g]	Superplast. [g]
CC2	48	2.256	12.72	42.48	0	48.96	7.63	76.59	0
CAA 2	48	8.688	11.952	22.18	14.784	45.26	9.37	19.44	96.33

Fonte: Elaborado pelo autor.

A ordem de adição dos materiais na betoneira, para todos os casos foi, brita 0, água (cerca de 80%), cimento, cinza, areia regular, areia fina, água (o restante), aditivo polifuncional e aditivo superplastificante.

No dia da moldagem, inicialmente foram pesados os materiais secos, brita 0, areia regular, areia fina, cimento e cinza, necessários para as três betonadas. A água e os aditivos foram pesados imediatamente antes do início da mistura dos materiais de cada betonada.

Na sequência, realizou-se a imprimação da betoneira, e após, foi rodada a primeira betonada. Ao finalizar a mistura do concreto, verificou-se a trabalhabilidade, no caso dos convencionais, e o espalhamento, no caso dos autoadensáveis.

Os exemplares da primeira betonada foram moldados conforme ilustra a Figura 13, juntamente com os testemunhos de resistência. O concreto excedente na betoneira foi descartado em local apropriado.

Todos os processos supracitados, exceto a imprimação, foram repetidos para a segunda e terceira betonada.

Os testemunhos de resistência foram moldados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016), para os corpos de prova compostos de concreto convencional, foi realizada compactação manual, e para os de concreto autoadensável não foi realizada compactação.

Figura 13 – Exemplares moldados



Fonte: Elaborado pelo autor.

O adensamento dos corpos de prova foi realizado conforme as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2016), sendo:

- Série 1 – adensamento manual considerando a dimensão básica de 150 mm devido à elevada trabalhabilidade do concreto, que apresentou abatimento próximo a 160 mm. Portanto, o adensamento foi realizado em duas camadas com aplicação de 75 golpes a cada camada.
- Série 2 – adensamento mecânico, realizado por meio de vibrador de imersão de alta frequência, em apenas uma camada, adotando o mesmo critério da dimensão básica de 150 mm.
- Série 3 – sem adensamento, devido a utilização da tecnologia do concreto autoadensável. A etapa de adensamento neste caso foi dispensada.

3.5.3 Cura e corte dos corpos de prova

Após moldagem, os corpos de prova foram desformados e transportados para um local protegido de intempéries, com pouca incidência solar, adequado para o processo de cura.

Para garantir uma elevada umidade no ambiente, utilizou-se uma lona para envolver os corpos de prova, que foram molhados diariamente até o dia do ensaio. A Figura 14 elucida como foi executado o processo de cura.

Figura 14 – Cura dos corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando os exemplares atingiram a idade de 7 dias, foram levados novamente ao Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos, onde foram cortados ao meio, separando os corpos de prova para o ensaio de arrancamento, que até então estavam unidos em um único exemplar, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Separação dos corpos de prova de arrancamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO E COMPRESSÃO

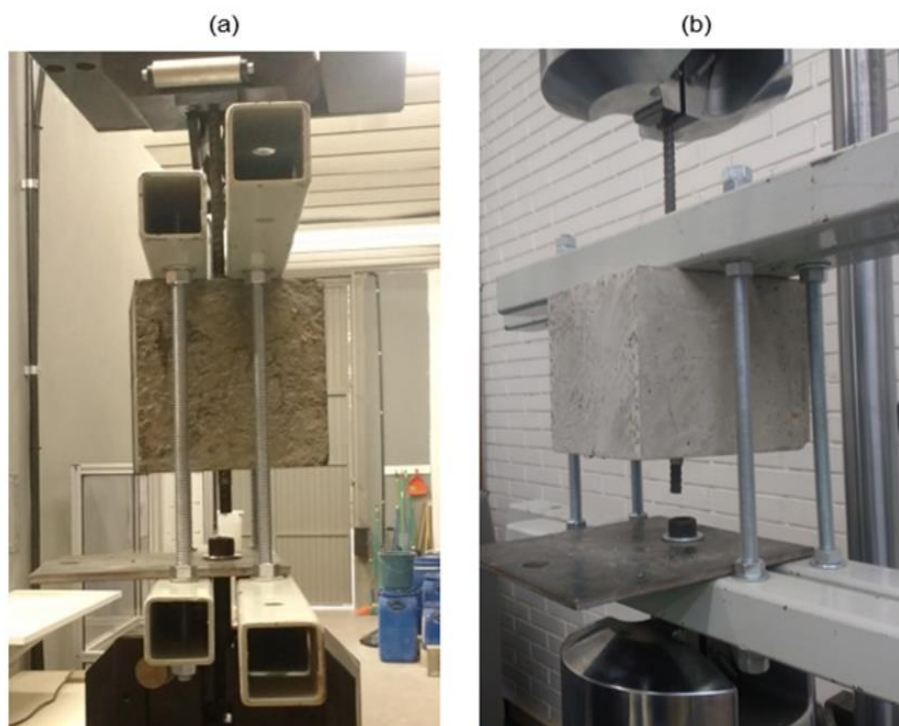
Os ensaios de arrancamento foram realizados por meio de máquinas, aplicando forças de tração. Para viabilizar o ensaio, desenvolveu-se uma estrutura de

reação, com a função de transmitir as cargas geradas pelo equipamento, para o bloco de concreto. A estrutura foi composta por dois pórticos constituídos de tubos metálicos, barras rosqueadas, porcas e arruelas.

As séries 1 e 2 foram ensaiadas no Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil (Itt Performance) por meio de uma prensa da marca Instron série 23 com capacidade de 250 kN. Contudo, devido a problemas no equipamento, foi necessário realizar os ensaios da série 3 em uma máquina diferente, junto ao Laboratório de Ensaio Mecânicos da Unisinos por meio de uma prensa da marca MTS Landmark de mesma capacidade.

A instrumentação dos ensaios em ambos os equipamentos foi realizada da mesma forma, respeitando os seguintes procedimentos: o trecho maior da barra, onde se aplica a força, foi preso a parte superior da máquina; um parafuso, envolvido por uma chapa de aço, foi fixado a parte inferior da prensa; os pórticos foram posicionados transmitindo a reação da chapa para o bloco de concreto. A Figura 16 ilustra a instrumentação em ambas as máquinas.

Figura 16 – Instrumentação de ensaios de arrachamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda:

(a) Ensaio instrumentado no Itt Performance; (b) Ensaio instrumentado no Laboratório de Ensaios Mecânicos

A velocidade de realização dos ensaios foi controlada por deslocamento, em mm/min. Nos ensaios realizados no Itt Performance, utilizou-se a velocidade máxima recomendada pela ACI 440.3R (2004) de 1,3 mm/min. Para os ensaios executados no Laboratório de Ensaios Mecânicos, devido precisão do equipamento, não foi possível utilizar a mesma velocidade, sendo utilizada a de 1,2 mm/min, por ser o valor inferior mais próximo possível.

Os resultados obtidos nos ensaios foram curvas e tabelas de força por deformação. Os valores de força foram convertidos em tensão através da Equação 6, considerando a distribuição de tensão constante ao longo do comprimento.

Equação 6 – Conversão da Força em tensão aderente

$$\sigma = \frac{P * 10}{2 * \pi * r * l}$$

Onde:

σ = tensão aderente [MPa];

P = carga [N];

l = comprimento aderente [cm];

r = raio da barra [cm].

3.7 EXTRAÇÃO E ENSAIO DE ABSORÇÃO CAPILAR

Após a execução dos ensaios de arrancamento, baseado nos resultados de força máxima encontrados, foram selecionados os corpos de prova de uma betonada de cada série, dos quais foram extraídos os corpos de prova para o ensaio de absorção capilar.

A escolha da betonada de cada série foi realizada levando em consideração a distinção de resultados entre as diferentes posições da barra, bem como as variações encontradas entre os valores em mesma posição. Sendo assim, foram selecionados os corpos de prova da segunda betonada da série 1, e das primeiras betonadas das séries 2 e 3.

Desta forma, os corpos de prova foram cortados em formato prismático, de dimensões próximas a 5x5x9 cm, com o auxílio de uma serra circular diamantada, de forma que uma das faces do prisma extraído ficasse o mais próximo da barra, sendo retirado na mesma altura em relação a moldagem que a barra, conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17 – Posição dos prismas extraídos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram extraídos três prismas de cada corpo de prova para realização do ensaio de absorção capilar conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012).

Os corpos foram secos em estufa até atingirem constância de massa, na idade de 28 dias. As faces próximas à barra foram expostas à água em uma lâmina de 5 (± 1) mm, sendo verificada a massa após exposição em 3, 6 e 24 horas.

Após as medições de massa, foram medidas as quatro arestas de cada prisma para determinar a área de exposição.

A absorção de água por capilaridade foi calculado conforme a Equação 7, definida pela norma supracitada.

Equação 7 – Determinação da absorção de água por capilaridade

$$C = \frac{M_{sat} - M_s}{S}$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade [g/cm²];

M_{sat} = massa do corpo de prova após "t" horas de contato com a água [g];

M_s = massa do corpo de prova após a constância de massa [g];

S = área da seção exposta à água [cm²].

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos do programa experimental proposto. Como principal resultado, evidenciam-se os gráficos compostos pelas curvas de tensão aderente x deslocamento e os valores de tensão máxima, das três condições de adensamento. A análise destes resultados decorreu em diferentes âmbitos, envolvendo o comportamento das curvas, diferenças entre os resultados numéricos obtidos, controle da resistência e porosidade do concreto, além de realizar-se uma análise frente à ABNT NBR 6118:2014.

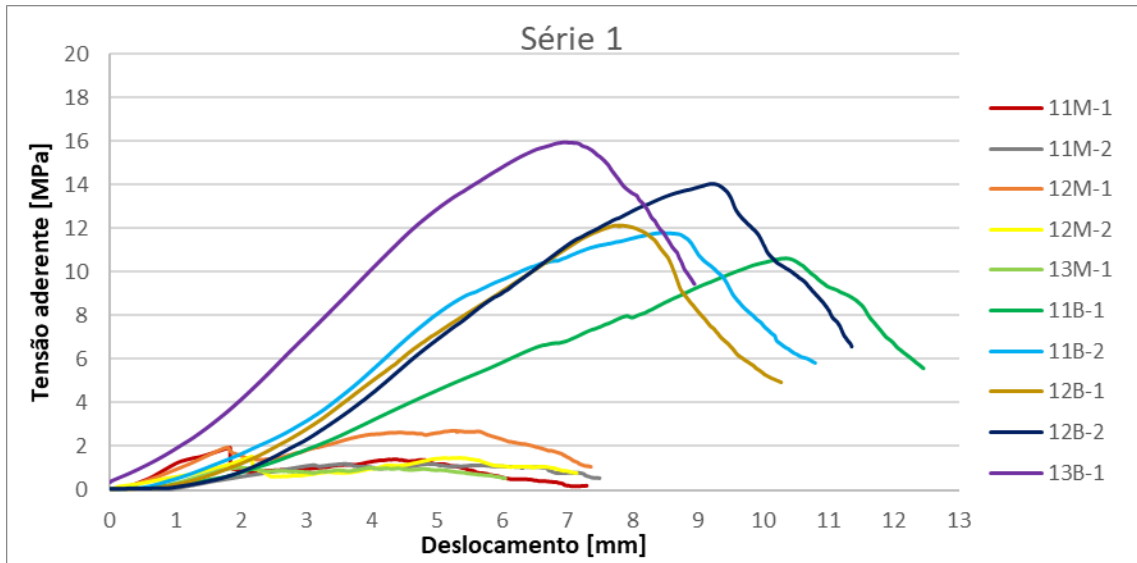
4.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados expostos a seguir foram obtidos durante o programa experimental realizado, incluindo os ensaios de arrancamento, resistência à compressão e absorção capilar.

4.1.1 Ensaio de arrancamento (*pull-out test*)

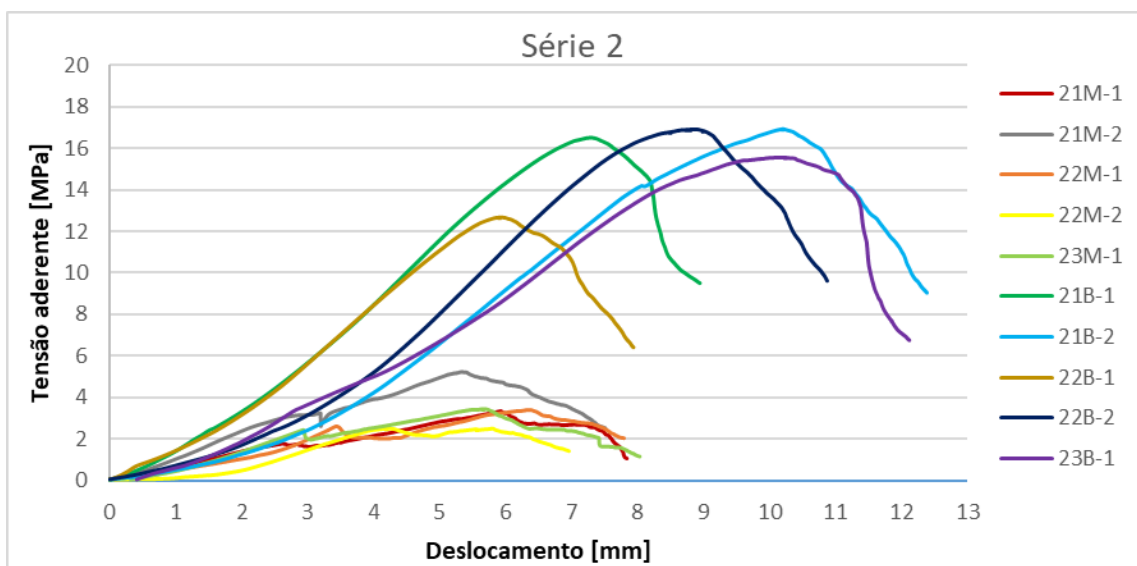
Os resultados em forma visual constituídos por curvas de tensão aderente por deslocamento, apresentam-se nos Gráfico 2, Gráfico 3 e Gráfico 4 que correspondem, respectivamente ao adensamento manual, adensamento mecânico e autoadensável.

Gráfico 2 – Curvas tensão aderente x deslocamento para adensamento manual



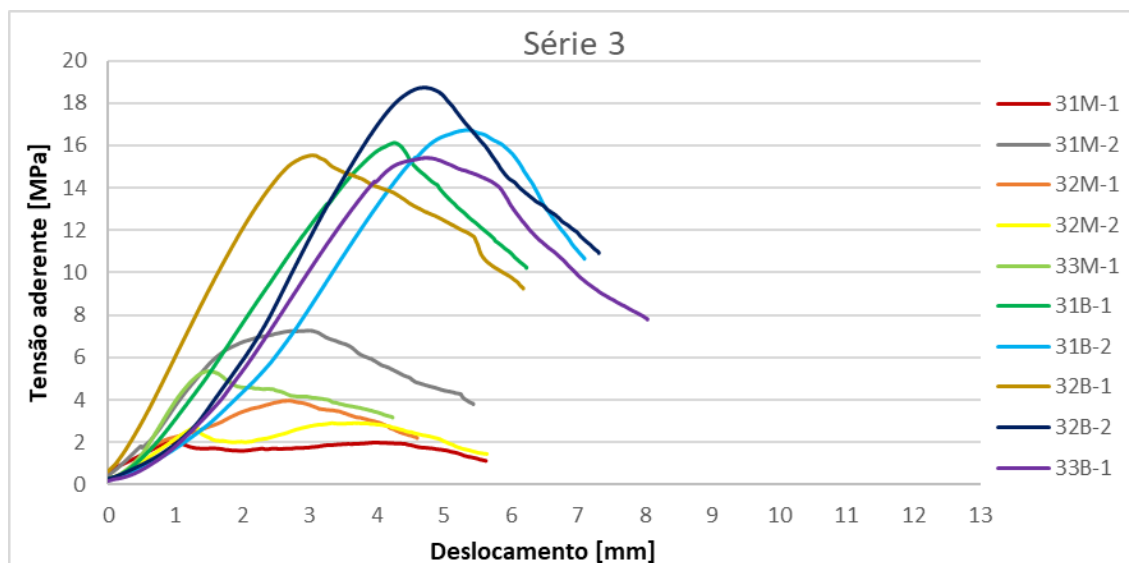
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 - Curvas tensão aderente x deslocamento para adensamento mecânico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 4 - Curvas tensão aderente x deslocamento para autoadensável



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos gráficos percebe-se a diferença de comportamento entre os corpos de prova em situação de boa e má aderência, onde os corpos de prova em boa aderência atingem tensões superiores e apresentam uma linearidade maior no desenvolvimento da curva.

Em todos os 30 corpos de prova ensaiados, verificou-se a ruptura por arrancamento da barra, sem apresentar fissuras de fendilhamento no concreto. Mesmo apresentando semelhança na forma de ruptura, nota-se uma variação considerável entre os resultados, sendo avaliado os picos e até mesmo as inclinações das curvas.

Os valores numéricos de carga máxima resistente ($F_{m\acute{a}x}$), deslocamento ocorrido na carga máxima (D_{inst}) e tensão de aderência máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$), para cada corpo de prova são demonstrados na Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10 que correspondem, respectivamente, as séries 1, 2 e 3.

Tabela 8 – Resultados obtidos nos ensaios de arrancamento da série 1

Corpos de prova adensamento manual			
CP	F máx	D inst	σ máx
	[N]	[mm]	[Mpa]
11M-1	4767	1.83	1.94
11M-2	2947	3.58	1.20
12M-1	6662	5.27	2.71
12M-2	3776	2.17	1.54
13M-1	2550	2.01	1.04
Media 1_M	4140.4	2.972	1.69
11B-1	26062	10.34	10.62
11B-2	28945	8.44	11.79
12B-1	29774	7.8	12.13
12B-2	34450	9.22	14.04
13B-1	39117	6.96	15.94
Media 1_B	31669.6	8.552	12.90

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Resultados obtidos nos ensaios de arrancamento da série 2

Corpos de prova adensamento mecânico			
CP	F máx	D inst	σ máx
	[N]	[mm]	[Mpa]
21M-1	8206	5.93	3.34
21M-2	12826	5.33	5.23
22M-1	8323	6.34	3.39
22M-2	6135	4.21	2.50
23M-1	8455	5.68	3.44
Media 2_M	8789	5.498	3.58
21B-1	40522	7.3	16.51
21B-2	41538	10.19	16.92
22B-1	31094	5.91	12.67
22B-2	41510	8.85	16.91
23B-1	38182	10.22	15.56
Media 2_B	38569.2	8.494	15.71

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Resultados obtidos nos ensaios de arrancamento da série 3

Corpos de prova concreto autoadensável			
CP	F_{máx}	D_{inst}	σ máx
	[N]	[mm]	[Mpa]
31M-1	4990	1.04	2.03
31M-2	17846	2.98	7.27
32M-1	9724	2.7	3.96
32M-2	7129	3.33	2.90
33M-1	13126	1.5	5.35
Media 3_M	10563	2.31	4.30
31B-1	39587	4.26	16.13
31B-2	41069	5.38	16.73
32B-1	38125	3.04	15.53
32B-2	45977	4.71	18.73
33B-1	37836	4.75	15.42
Media 3_B	40518.8	4.428	16.51

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos valores numéricos, a dispersão de resultados constatada nos gráficos acima se comprova pela variação dos valores de carga máxima e deslocamento correspondente.

Verificando as médias obtidas, percebe-se um crescimento no desempenho, partindo de resultados inferiores na série 1, sendo os melhores resultados evidenciados na série 3.

4.1.2 Controle do concreto

A seguir, na Tabela 11, apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão axial, realizados para caracterizar a resistência do concreto de cada betonada utilizada na moldagem dos corpos de prova de arrancamento.

Tabela 11 – Resultados ensaio de compressão

CP	D méd	Altura	F max	Tensão	fc ₇ da betonada
	Mm	mm	kN	MPa	MPa
11-1	100.6	197	206.47	25.98	25.98
11-2	100.8	196	194.44	24.37	
11-3	100.15	195	190.47	24.18	
12-1	100.45	199	219.04	27.64	27.64
12-2	100.3	198	195.38	24.73	
12-3	99.9	196	194.55	24.82	
13-1	100.45	195	207.23	26.15	27.16
13-2	100.7	197	186.75	23.45	
13-3	100.45	195	215.23	27.16	
21-1	100.15	196	209.61	26.61	29.90
21-2	99.95	199	234.62	29.90	
21-3	100.45	195	224.95	28.39	
22-1	99.85	198	222.47	28.41	28.90
22-2	100.2	198	209.05	26.51	
22-3	99.85	196	226.29	28.90	
23-1	100.2	197	236.16	29.95	31.34
23-2	100.45	197	248.38	31.34	
23-3	100.35	198	232.05	29.34	
31-1	100.8	195	199	24.94	25.85
31-2	100.35	198	204.42	25.85	
31-3	100.45	195	195.93	24.72	
32-1	100.75	195	195.15	24.48	25.73
32-2	100.3	197	203.33	25.73	
32-3	100.05	195	188.07	23.92	
33-1	100.25	195	196.94	24.95	24.95
33-2	100.8	195	193.89	24.30	
33-3	100.45	198	193.48	24.41	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao realizar este controle da resistência à compressão, percebeu-se uma pequena variação do valor característico entre as betonadas de uma mesma série e uma variação maior nas resistências entre as séries. Estas variações, podem ter influenciado nos resultados obtidos nos ensaios de arrancamento.

Os resultados de controle de trabalhabilidade, para cada betonada, sendo de abatimento para os convencionais e espalhamento para o autoadensável, destacam-se na Tabela 12.

Tabela 12 – Verificação de trabalhabilidade

Série	Betonada	Abatimento [mm]	Espalhamento [mm]
1	1	155	-
1	2	150	-
1	3	155	-
2	1	150	-
2	2	150	-
2	3	145	-
3	1	-	640
3	2	-	630
3	3	-	620

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que em todas as betonadas de concreto convencional, o abatimento mostrou-se próximo a 160 mm e superior a 100 mm, sendo classificado, segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015), como S160. Com relação às betonadas de concreto autoadensável, o espalhamento apresentou-se próximo a 650 mm e superior a 550 mm sendo classificado, conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2017), como SF1.

4.1.3 Resultados absorção capilar

A seguir são apresentados, na Tabela 13, os resultados obtidos nos ensaios de absorção capilar.

Tabela 13 – Resultados ensaio de absorção capilar

CP	Massa seca [g]	Massa 3h [g]	Massa 6h [g]	Massa 24h [g]	Área [cm ²]	S 3h [g/cm ²]	S 6h [g/cm ²]	S 24 h [g/cm ²]
12M-1A	458	465.4	467.7	474.5	24.74	0.299	0.392	0.667
12M-1B	490.8	498.2	500.4	506.5	25.52	0.290	0.376	0.615
12M-1C	498.1	506.1	508.5	514.6	26.44	0.303	0.393	0.624
12M-2A	475.2	482.1	484.6	490.7	25.42	0.271	0.370	0.610
12M-2B	488	495.2	497.4	503.9	26.22	0.275	0.359	0.607
12M-2C	476.2	482.5	485	491.7	25.75	0.245	0.342	0.602
12B-1A	449.6	455.8	457.6	463.1	23.95	0.259	0.334	0.564
12B-1B	439.4	445.7	448	453.8	24.63	0.256	0.349	0.585
12B-1C	423.4	429.6	431.2	436.7	24.93	0.249	0.313	0.533
12B-2A	458.8	464.8	466.9	472.6	25.04	0.240	0.324	0.551
12B-2B	466	471.9	474	479.5	26.35	0.224	0.304	0.512
12B-2C	464.1	470.3	472.3	477.7	25.96	0.239	0.316	0.524
21M-1A	478.2	484.2	486.5	492.6	25.37	0.236	0.327	0.568
21M-1B	464.3	470.8	472.9	479.1	24.52	0.265	0.351	0.604
21M-1C	474.6	481.6	483.8	490	25.53	0.274	0.360	0.603
21M-2A	404.5	410	412.1	417.4	22.03	0.250	0.345	0.586
21M-2B	443.5	450.2	452.7	459.3	24.14	0.277	0.381	0.654
21M-2C	470.6	477.6	479.9	485.6	24.89	0.281	0.374	0.603
21B-1A	461.9	467.1	468.9	474	25.43	0.204	0.275	0.476
21B-1B	440.7	447	449.3	455.1	24.36	0.259	0.353	0.591
21B-1C	459.1	465.1	467.2	472.6	25.52	0.235	0.317	0.529
21B-2A	468.6	475	477.2	483.2	24.67	0.259	0.349	0.592
21B-2B	448.4	454.2	456.2	461.9	23.92	0.242	0.326	0.564
21B-2C	430.2	436.4	438.1	443.5	23.17	0.268	0.341	0.574
31M-1A	442.9	450.8	453.4	460.6	24.73	0.319	0.425	0.716
31M-1B	456.1	463.3	466.7	475.2	26.02	0.277	0.407	0.734
31M-1C	434.2	442.9	445.8	453.7	25.60	0.340	0.453	0.762
31M-2A	458.6	466.8	469.9	479	25.97	0.316	0.435	0.786
31M-2B	452.4	460.3	463.5	472.7	25.48	0.310	0.436	0.797
31M-2C	444.3	452.1	454.9	463.1	24.50	0.318	0.433	0.767
31B-1A	451.8	459.1	461.9	470.2	25.82	0.283	0.391	0.713
31B-1B	465.1	473	476.4	485	26.60	0.297	0.425	0.748
31B-1C	448.7	455.7	458.6	466.5	24.30	0.288	0.407	0.732
31B-2A	438.4	446	448.6	456.3	25.36	0.300	0.402	0.706
31B-2B	457.9	465.5	468.4	476.1	25.51	0.298	0.412	0.713
31B-2C	451.8	459.6	462.5	469.5	24.46	0.319	0.438	0.724

Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente ao observar os valores da Tabela 13, percebe-se bastante proximidade nos resultados entre as series 1 e 2, pelo fato de serem compostos do mesmo traço, ao mesmo tempo que verifica-se valores maiores de absorção para o traço de concreto autoadensável.

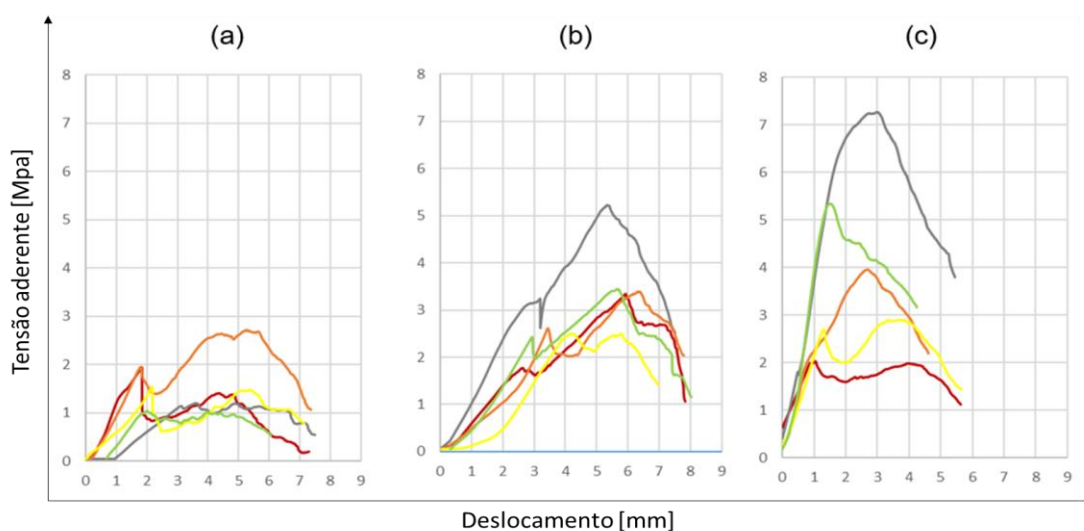
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nos resultados apresentados acima, foram realizadas análises em relação ao comportamento dos corpos de prova durante os ensaios, variabilidade e diferença dos resultados, influência da resistência e porosidade do concreto.

4.2.1 Análise do comportamento dos gráficos

A partir do desenvolvimento dos gráficos de tensão por deslocamento de cada ensaio realizado, pode-se compreender sobre o comportamento de cada corpo de prova durante o ensaio. No Gráfico 5 foram demonstrados os resultados em que a barra encontrava-se em situação desfavorável, enquanto as curvas dos ensaios realizados em boa aderência, apresentam-se no Gráfico 6.

Gráfico 5 – Curvas tensão x deslocamento em zona de má aderência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

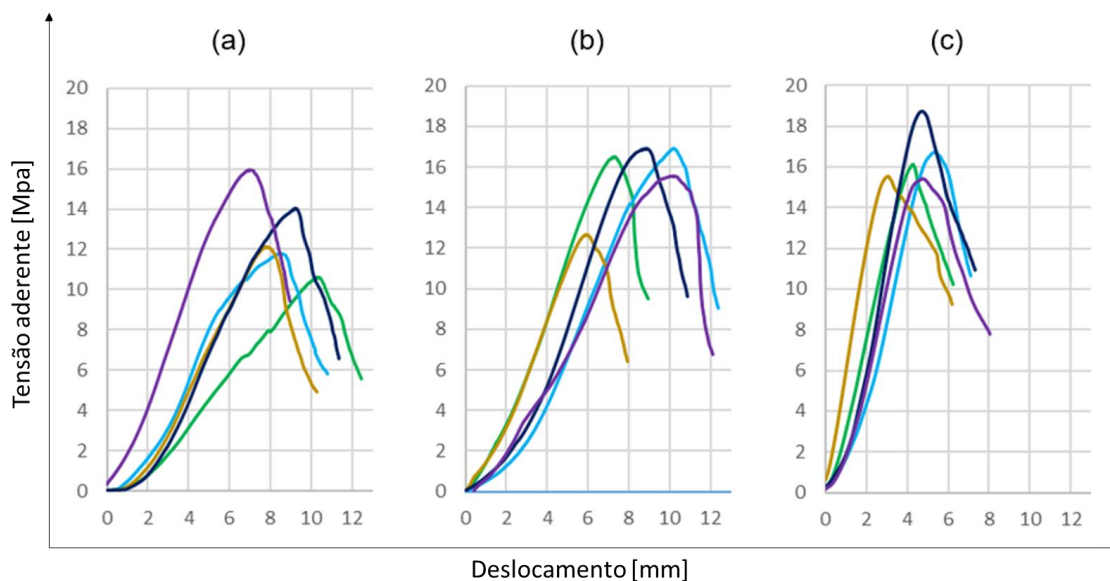
Legenda: (a) Resultados adensamento manual; (b) Resultados adensamento mecânico; (c) Resultados autoadensável.

Ao visualizar as curvas dos ensaios de má aderência, para as três formas de adensamento, percebe-se a predominância de um comportamento das curvas. A maioria dos corpos de prova apresenta um acréscimo de tensão enquanto o deslocamento aumenta, seguidos por uma queda rápida na tensão, que representa um escorregamento brusco da barra, que logo é estabilizado apresentando novamente elevação no valor de resistência.

Ao comparar as partes (a) e (b) do Gráfico 5, referente aos resultados dos concretos convencionais, percebe-se a grande influência exercida pelo adensamento nas curvas. Inicialmente, verifica-se que o escorregamento brusco ocorre em tensões mais elevadas, entretanto a principal diferença está na taxa de acréscimo de tensão após este escorregamento. Na parte (b) percebe-se que a inclinação da reta que representa a retomada no ganho de resistência, aproxima-se da inclinação da reta inicial. Já no segmento (a), a retomada de acréscimo de tensão acontece de forma mais lenta, e por muitas vezes não se atinge novamente a resistência do escorregamento.

Em relação à parte (c) do Gráfico 5 percebe-se um comportamento distinto do supracitado, em três dos cinco corpos de prova ensaiados. Nestes, a curva não apresenta o escorregamento brusco da barra, apresentando um acréscimo constante de tensão até atingir seu valor máximo. Quando o gráfico mostrou este comportamento mais linear, semelhante às encontradas em situação de boa aderência, os resultados de tensão máxima tiveram uma expressiva melhora em relação aos demais, o que elevou a média dos resultados do concreto autoadensável, sendo a maior dentre as três séries.

Gráfico 6 – Curvas tensão x deslocamento em zona de boa aderência



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (a) Resultados adensamento manual; (b) Resultados adensamento mecânico; (c) Resultados concreto autoadensável.

Diferente dos resultados obtidos nos ensaios realizados na zona de má aderência, os três conjuntos de curvas, em situação de boa aderência, destacados no Gráfico 6, evidenciam um comportamento uniforme entre todos os ensaios. Todos resultados apresentam uma ascensão linear da tensão aderente com o acréscimo do deslocamento. Entretanto, ainda neste caso, verifica-se uma variabilidade grande entre os valores de picos, e até mesmo nas taxas de incremento de tensão, que também é percebida nos resultados de má aderência.

Comparando os conjuntos de curvas, entre as três series, pode-se destacar o desempenho do concreto autoadensável, na parte (c) do Gráfico 6, onde percebe-se as maiores inclinações das curvas em relação a horizontal. Desta forma, apresentam uma taxa de acréscimo de tensão maior, resistindo aos esforços com menores deslocamentos.

4.2.2 Análise da variação dos resultados

A partir dos resultados numéricos de força máxima resistida e de tensão de aderência, percebe-se uma elevada variabilidade entre estes. Onde são identificados

valores com elevada diferença dentro de uma mesma situação de adensamento e posição da barra, e até mesmo quando feitos a partir da mesma betona.

Para mesurar esta variação, foram utilizados os conceitos de desvio padrão e coeficiente de variação, sendo estes dois valores estatísticos calculados para cada combinação de forma de adensamento e posição da barra, tendo seus resultados expressos na Tabela 14.

Tabela 14 – Desvios padrão e coeficientes de variação

Conjunto de dados	Desv. Padrão	Coef. Variação
Série 1 - má aderência	1.299	0.770
Série 1 - boa aderência	3.592	0.278
Série 2 - má aderência	1.892	0.528
Série 2 - boa aderência	3.964	0.252
Série 3 - má aderência	2.075	0.482
Série 3 - boa aderência	4.063	0.246

Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível verificar que os maiores valores de desvio padrão ocorrem nos conjuntos de dados em situação de boa aderência, isso acontece pelo fato dos resultados nestes casos envolverem valores de maior magnitude. O valor estatístico mais importante neste caso é o coeficiente de variação, pois indica a variabilidade dos resultados sem levar em consideração a ordem de grandeza dos mesmos.

A partir do coeficiente de variação, percebe-se que na verdade, as maiores variabilidades ocorreram quando a barra estava localizada nas zonas de má aderência, onde resultam os três maiores coeficientes.

É possível ainda constatar a influência da forma de adensamento na variabilidade dos resultados, tendo em vista que os corpos de prova adensados manualmente apresentaram os maiores coeficientes de variação, tanto em boa como em má aderência. Enquanto os corpos prova de concreto autoadensável demonstraram os menores coeficientes.

Desta forma, percebe-se que mesmo mantendo o operador, pequenas diferenças de moldagem podem influenciar nos resultados, visto que para o adensamento que apresenta maior influência do operador, houve maior variabilidade. Enquanto o menor coeficiente de variação encontra-se no caso em que o concreto não depende de fatores externos para sua compactação.

4.2.3 Relação entre boa e má aderência e comparativo com a NBR 6118

A partir dos gráficos e dos valores obtidos para as três séries é possível identificar uma grande diferença de comportamento entre as barras localizadas nas zonas de má aderência e as em situação de boa aderência, o que já era esperado, e vai de encontro com a norma ABNT NBR 6118:2014.

Entretanto, a norma supracitada indica uma redução de apenas 30% na resistência de aderência em situação desfavorável quando em comparação com a favorável. Contudo, a partir dos resultados obtidos, percebe-se que essa redução é mais expressiva, como fica evidenciado na Tabela 15.

Tabela 15 – Relação boa x má aderência e redução de resistência

	Série 1	Série 2	Série 3	Norma
Média B [N]	31669.6	38569.2	40518.8	1
Média M [N]	4140.4	8789	10563	0.7
Redução de resistência [%]	86.92626367	77.21238709	73.93061986	30
Fator de redução	0.131	0.228	0.261	0.7

Fonte: Elaborado pelo autor.

As reduções de força obtidas para as três situações de adensamento ficam acima dos 30%, ocorrendo na série 1 a maior diferença, apresentando um fator de redução 5,34 vezes menor do que o valor previsto pela normativa. Enquanto a menor diferença, ocorrida na série 3, apresenta um fator 2,68 vezes menor do que 0,7.

A ocorrência dessa redução excessiva de aderência com relação ao prescrito pela norma, pode ser explicado, conforme Ribeiro (1985), pelo forma de ruptura característica do ensaio do tipo *pull-out test* de arrancamento da barra, a partir do esmagamento dos consoles de concreto. Com relação às aplicações reais, como vigas, essa discrepância entre os valores não é tão acentuada devido à ruptura ocorrer por fendilhamento.

Entretanto, essa redução expressiva de resistência não significa que os resultados não superem os calculados conforme a norma. A Tabela 16 apresenta os resultados de tensão obtidos no ensaio, bem como os calculado seguindo as recomendações da ABNT NBR 6118:2014.

Tabela 16 – Resultados obtidos x Valores calculados

Corpos de prova adensamento manual							
CP	F máx	σ máx	F_{c7}	F_{ctd7}	F calc	σ calc	Relação obtido/calculado
	[N]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[N]	[Mpa]	
11M-1	4767	1.94	25.98	1.09649	4238.61	1.73	1.12
11M-2	2947	1.20	25.98	1.09649	4238.61	1.73	0.70
12M-1	6662	2.71	27.64	1.14271	4417.29	1.80	1.51
12M-2	3776	1.54	27.64	1.14271	4417.29	1.80	0.85
13M-1	2550	1.04	27.16	1.12944	4366	1.78	0.58
11B-1	26062	10.62	25.98	1.09649	6055.15	2.47	4.30
11B-2	28945	11.79	25.98	1.09649	6055.15	2.47	4.78
12B-1	29774	12.13	27.64	1.14271	6310.41	2.57	4.72
12B-2	34450	14.04	27.64	1.14271	6310.41	2.57	5.46
13B-1	39117	15.94	27.16	1.12944	6237.14	2.54	6.27
Corpos de prova adensamento mecânico							
CP	F máx	σ máx	F_{c7}	F_{ctd7}	F calc	σ calc	Relação obtido/calculado
	[N]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[N]	[Mpa]	
21M-1	8206	3.34	29.9	1.20418	4654.91	1.90	1.76
21M-2	12826	5.23	29.9	1.20418	4654.91	1.90	2.76
22M-1	8323	3.39	28.9	1.17718	4550.53	1.85	1.83
22M-2	6135	2.50	28.9	1.17718	4550.53	1.85	1.35
23M-1	8455	3.44	31.34	1.24254	4803.19	1.96	1.76
21B-1	40522	16.51	29.9	1.20418	6649.87	2.71	6.09
21B-2	41538	16.92	29.9	1.20418	6649.87	2.71	6.25
22B-1	31094	12.67	28.9	1.17718	6500.76	2.65	4.78
22B-2	41510	16.91	28.9	1.17718	6500.76	2.65	6.39
23B-1	38182	15.56	31.34	1.24254	6861.7	2.80	5.56
Corpos de prova autoadensável							
CP	F máx	σ máx	F_{c7}	F_{ctd7}	F calc	σ calc	Relação obtido/calculado
	[N]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[N]	[Mpa]	
31M-1	4990	2.03	25.85	1.09282	4224.46	1.72	1.18
31M-2	17846	7.27	25.85	1.09282	4224.46	1.72	4.22
32M-1	9724	3.96	25.73	1.08944	4211.37	1.72	2.31
32M-2	7129	2.90	25.73	1.08944	4211.37	1.72	1.69
33M-1	13126	5.35	24.95	1.06731	4125.83	1.68	3.18
31B-1	39587	16.13	25.85	1.09282	6034.94	2.46	6.56
31B-2	41069	16.73	25.85	1.09282	6034.94	2.46	6.81
32B-1	38125	15.53	25.73	1.08944	6016.25	2.45	6.34
32B-2	45977	18.73	25.73	1.08944	6016.25	2.45	7.64
33B-1	37836	15.42	24.95	1.06731	5894.04	2.40	6.42

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre todos os corpos de prova ensaiados, evidencia-se pela Tabela 16, que apenas três apresentaram resultados inferiores aos calculados pela norma, sendo os três pertencentes à série 1, os quais passaram por adensamento manual e

apresentaram a barra localizada na zona de má aderência. Comprovando-se, a partir destas situações, que o comprimento de ancoragem definido em projeto seria insuficiente.

Os corpos de prova que passaram por processo de adensamento mecânico e autoadensável, superaram o valor calculado em todos os ensaios, demonstrando que seguem a prescrição da ABNT NBR 6118:2014. Através da relação entre o valor obtido sobre o calculado, quantifica-se um fator de segurança, ou seja, quantas vezes o resultado supera o valor calculado que seria utilizado em projeto.

Para analisar os fatores de segurança, é prudente utilizar o menor valor para cada combinação de variáveis, devido a considerável variação entre os resultados.

Verificando os coeficientes na má aderência, confirma-se que na série 1 não há segurança, pelo fato de o menor resultado apresentar valor abaixo de 1. Enquanto nas séries 2 e 3, os menores fatores de segurança são respectivamente 1,35 e 1,18, indicando que há segurança, mesmo correspondendo a valores bem próximos a 1.

Os resultados supracitados evidenciam a importância do adensamento mecânico no caso de estruturas em concreto convencional, em especial na confecção de elementos com mais de 30 cm de altura, onde inicia-se a zona de má aderência, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Entretendo, a NBR 14931 (ABNT, 2004), que rege os procedimentos de execução de estruturas de concreto armado, permite o adensamento manual, desde que seja realizado em camadas de no máximo 20 cm de concreto, sem limitar a altura total do elemento.

Quanto aos casos em que as barras se encontram na zona de boa aderência, nota-se que os valores destes coeficientes aumentam consideravelmente, correspondendo as séries 1, 2 e 3, respectivamente, os menores valores de fator de segurança, 4,30; 4,78 e 6,34.

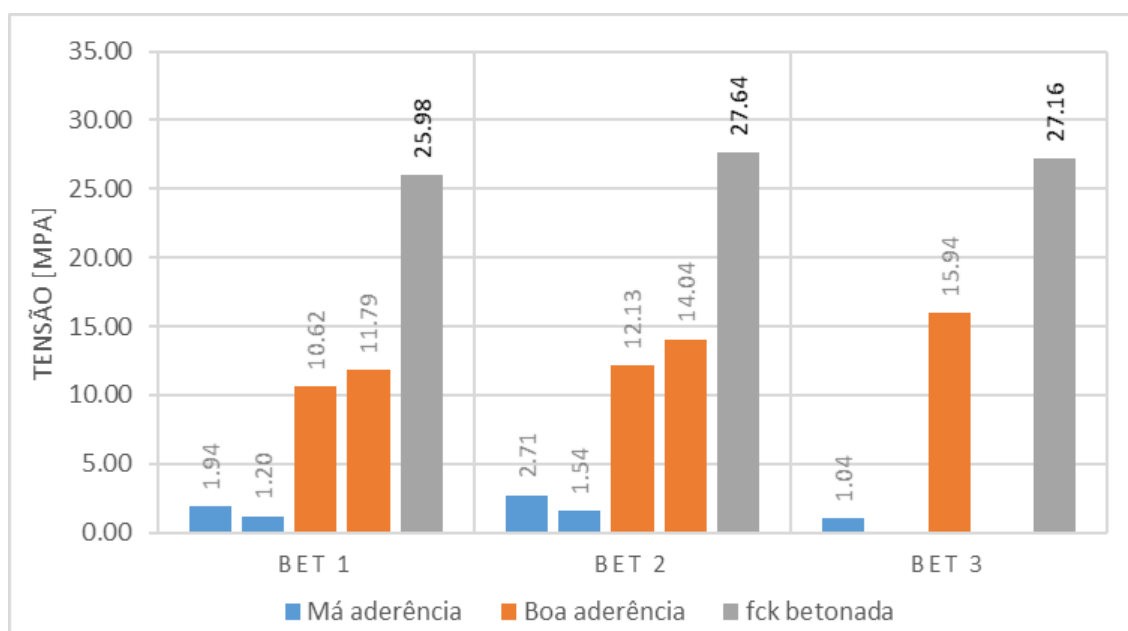
Desta forma, pode-se identificar um maior conservadorismo adotado pela ABNT NBR 6118:2014 para aderência de barras em situação favorável, em relação a desfavorável, visto que os valores obtidos nos ensaios em boa aderência superam em mais de quatro vezes o valor que seria utilizado em projetos.

4.2.4 Análise da influência da resistência à compressão

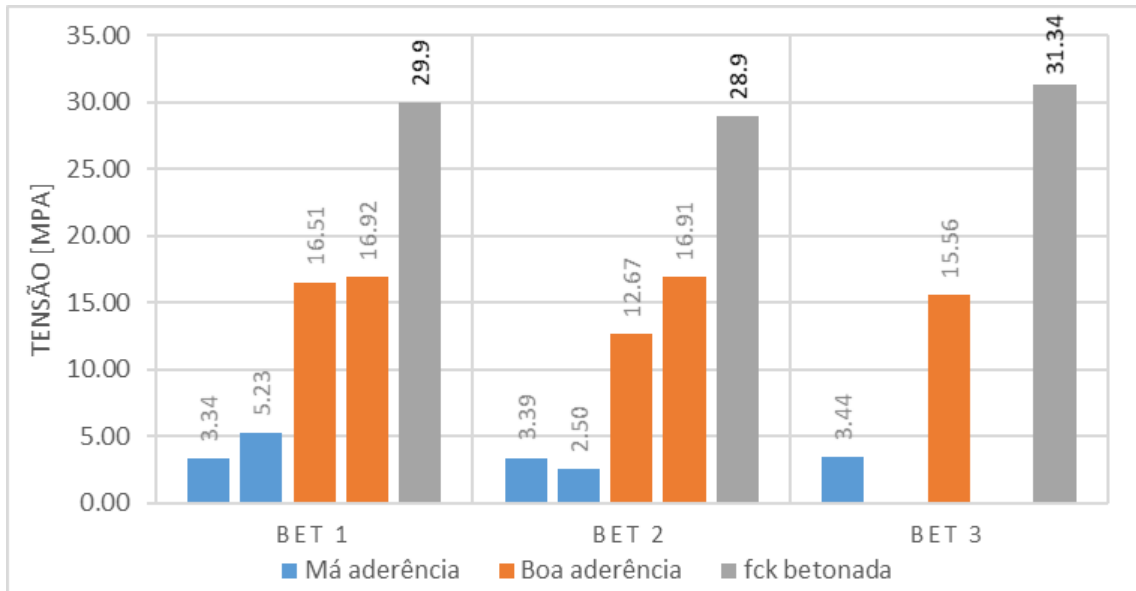
Conforme bibliografia, a resistência à compressão do concreto exerce influência significativa nos resultados dos ensaios de arrancamento da barra, sendo segundo Dumet (2003), um dos principais fatores que afetam as tensões de aderência. Por esse motivo, a cada betonada realizada, foram moldados testemunhos para avaliar essa influência, por mais que os traços tenham sido elaborados para uma mesma faixa de resistência.

O resumo dos resultados de tensão aderente e f_{c7} para cada adensamento, estão demonstrados nos Gráfico 7, Gráfico 8 e Gráfico 9.

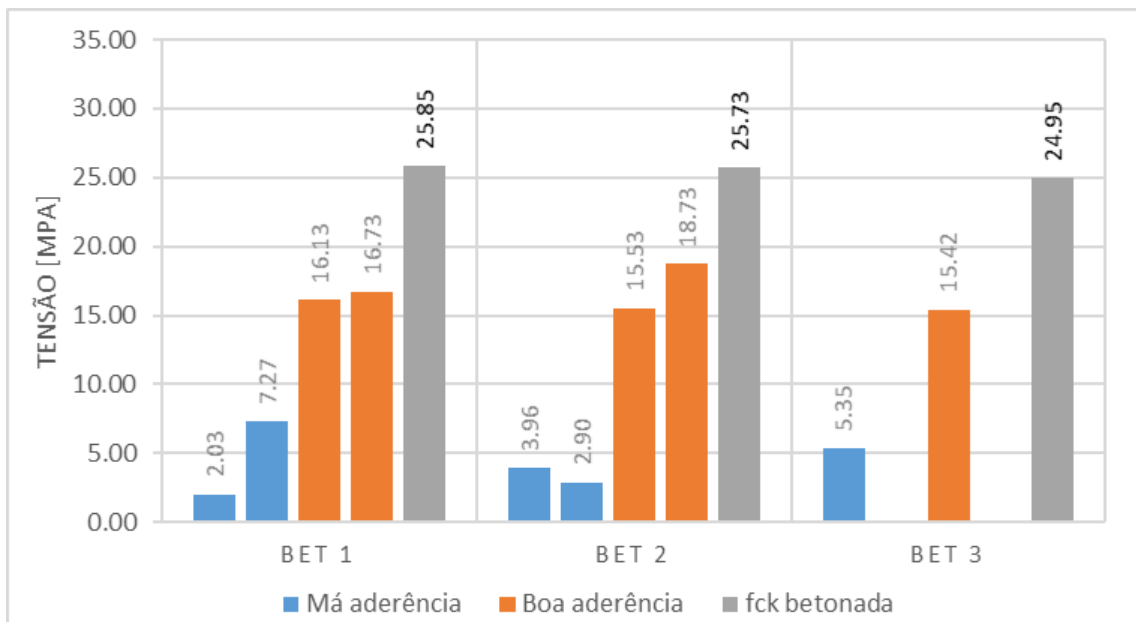
Gráfico 7 – Tensão aderente e f_{c7} para adensamento manual



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 8 - Tensão aderente e f_{c7} para adensamento mecânico

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 9 - Tensão aderente e f_{c7} para autoadensável

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em nenhum dos três gráficos referentes aos ensaios de arrancamento, verifica-se uma influência clara de variações de resistência entre uma betonada e outra.

Para exemplificar, no Gráfico 7, a betonada 3 apresenta um valor intermediário de resistência à compressão em relação as demais, obtendo f_{c7} maior em relação a betonada 1 e menor em comparação com a 2. Já em relação aos resultados de tensão aderente, a betonada 3 apresenta desempenho inferior em relação a 1 na má aderência, enquanto na boa aderência apresenta um melhor resultado quando comparado a betonada 2.

Percebe-se ainda que a influência do f_{c7} não fica evidente ao se analisar os três gráficos conjuntamente. Uma vez que os menores valores de f_{c7} foram encontrados no concreto autoadensável, justamente a condição em que se obteve os melhores resultados de tensão aderente.

Entretanto, comparando-se os dois gráficos de concreto convencional, que possuem a mesma composição de materiais, percebe-se que os corpos de prova da série 2, que detêm maiores f_{c7} , apresentam resultados da aderência superiores em comparação aos da série 1.

Portanto, como a diferença de resistência entre as betonadas são pequenas e os resultados dos ensaios de arrancamento possuem uma variabilidade considerável, não é possível quantificar a influência da resistência à compressão neste caso. Mesmo ao realizar uma comparação entre as séries, não é possível quantificar a influência da resistência, visto que as diferentes condições de adensamento entre os concretos convencionais e a diferente composição no caso do autoadensável, provavelmente exercem uma influência significativa.

4.2.5 Análise de resultados em relação a porosidade

Conforme constatado na bibliografia, a principal explicação para as reduções de tensão em relação à posição da barra ocorre pelo fato do acúmulo de argamassa porosa junto à barra, como indicado por Ribeiro (1985), que afirma que o melhor desempenho das barras localizadas na face inferior verifica-se devido ao melhor adensamento do concreto, que reduz o contato da barra com a argamassa porosa.

Por esse motivo, realizou-se uma análise frente à porosidade do concreto dos corpos de prova. O resumo dos resultados obtidos nos ensaios de absorção destacam-se Tabela 17.

Tabela 17 –Médias de resultados de absorção capilar

Série 1 - adensamento manual				
CP	S 3h [g/cm²]	S 6h [g/cm²]	S 24h [g/cm²]	Tensão de aderência [Mpa]
12M-1	0.297	0.387	0.635	2.71
12M-2	0.264	0.357	0.606	1.54
12B-1	0.254	0.332	0.561	12.13
12B-2	0.234	0.314	0.529	14.04
Série 2 - adensamento mecânico				
CP	S 3h [g/cm²]	S 6h [g/cm²]	S 24h [g/cm²]	Tensão de aderência [Mpa]
21M-1	0.259	0.346	0.591	3.34
21M-2	0.269	0.367	0.614	5.23
21B-1	0.233	0.315	0.532	16.51
21B-2	0.256	0.339	0.577	16.92
Série 3 – autoadensável				
CP	S 3h [g/cm²]	S 6h [g/cm²]	S 24h [g/cm²]	Tensão de aderência [Mpa]
31M-1	0.312	0.428	0.737	2.03
31M-2	0.315	0.434	0.783	7.27
31B-1	0.289	0.408	0.731	16.13
31B-2	0.306	0.417	0.714	16.73

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar os valores médios de absorção capilar, percebe-se uma diferença nos resultados encontrados entre corpos de prova com barra em posição de boa e má aderência. Fato esse que explica, ao menos em parte, que as maiores tensões se encontram nos casos em que a barra estava localizada em zona de boa aderência.

Portanto, a influência do adensamento fica evidenciada na diferença de porosidade que teve relevância na tensão entre boa e má aderência. O que reforça essa ideia é a variação mútua na absorção e na tensão de arrancamento.

Na Tabela 18 destacam-se as relações entre absorção e tensões dos corpos de prova analisados.

Tabela 18 – Relação M/B na absorção x relação B/M no arrancamento

CP	Média absorção 24h em M [g/cm ²]	Média absorção 24h em B [g/cm ²]	Média tensão M [MPa]	Média tensão B [MPa]	Relação M/B na absorção	Relação M/B no arrancamento
12	0.621	0.545	2.125	13.085	1.1393	0.1624
21	0.603	0.554	4.285	16.715	1.0875	0.2564
31	0.760	0.723	4.65	16.43	1.0518	0.2830

Fonte: Elaborado pelo autor.

Desta forma, percebe-se que os corpos de prova onde a zona de má aderência absorveu mais água em relação a boa, obteve uma redução expressiva na tensão de aderência.

Além disso, o concreto autoadensável apresentou os maiores resultados na absorção de água por capilaridade, e mesmo assim obteve valores de tensão próximos ao concreto convencional adensado mecanicamente.

Conforme estudos de Calado *et al.*, (2015), o desempenho do CAA e CC, frente a absorção capilar é semelhante para uma mesma relação água/cimento. Sendo assim, explicam-se os piores resultados do CAA, neste caso por utilizar uma relação a/c de 0,8 enquanto os convencionais possuem relação de 0,64.

Quanto à semelhança dos resultados na aderência entre o CAA e o CC adensado mecanicamente, torna-se difícil de compreender, visto que trabalhos como de Almeida Filho (2006), que encontram melhores desempenhos na aderência para concretos autoadensáveis, explicam o acréscimo de tensão à maior qualidade do material na zona de transição, o que não é verificado neste trabalho, onde o CAA apresenta maior absorção de água e menor resistência à compressão.

Entretanto, ainda segundo Almeida Filho (2006), com a utilização do CAA existe a tendência de acréscimos na resistência, devido sua característica de melhor preenchimento das fôrmas, que acaba envolvendo a barra de maneira mais efetiva, aumentando as parcelas de adesão e de atrito. Portanto, mesmo o CAA apresentando características físicas inferiores, devido ao melhor envolvimento da barra, houve a redução do número de vazios na zona de transição, que proporcionou resultados similares em relação ao concreto convencional com vibração mecânica, o qual supera o CAA em ambos parâmetros físicos estudados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A concepção de estruturas em concreto armado é uma das mais utilizadas no mundo, nas diversas escalas da construção civil, sendo o concreto o segundo material mais consumido no planeta atualmente. Essa grande difusão do sistema estrutural se deve pela alta resistência as intempéries e facilidade de acesso aos seus materiais componentes. A crescente complexidade das estruturas, alavancaram diversos avanços tecnológicos, principalmente com relação ao concreto, dentre elas pode-se destacar a tecnologia do concreto autoadensável, o qual preenche as fôrmas através de sua composição.

A estabilidade estrutural do concreto armado está intimamente ligada à aderência entre os dois materiais que a compõem, concreto e aço, sendo vital o funcionamento conjunto entre ambos, para que haja a transmissão de tensões necessária para suportar os esforços. Existem diversos fatores que influenciam na aderência entre aço e concreto, entre eles, destaca-se a influência do adensamento frente à aderência, o qual foi o objetivo do trabalho.

Os resultados do programa experimental, demonstram uma influência considerável da forma de adensamento nas tensões de aderência, em especial para barras posicionadas em zona de má aderência, na porção mais superior do concreto, a qual é mais afetada pelo adensamento. Sendo assim, pode-se destacar que quanto mais efetivo o adensamento melhor será a sinergia entre aço e concreto.

Além disso, o melhor adensamento do concreto reduz a diferença de tensões entre barras em situação favorável e desfavorável. Desta forma, favorece a resistência ao arrancamento das barras localizadas na zona de má aderência. Essa diferença foi consideravelmente maior do que a estipulada pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para as três formas de adensamento.

Outro comparativo realizado entre os resultados do programa experimental e a norma de projeto de estruturas de concreto, NBR 6118 (ABNT, 2014), foi a relação de tensões obtidas e calculadas. Através desta comparação, verifica-se a ineficácia do adensamento manual para concretos convencionais, visto que as tensões de aderência obtidas com barras em situação desfavorável não atingiram os valores utilizados em projeto em três dos cinco corpos de prova. As demais formas de adensamento se mostraram eficazes de forma que todos os corpos de prova superaram o valor de cálculo.

Desta forma, percebe-se uma grande vantagem em relação à aderência, frente ao uso do concreto autoadensável nas estruturas em concreto armado, pelo fato de os corpos de prova de CAA terem obtido as médias mais altas de tensão tanto em situação de boa, como de má aderência. Além de não sofrerem a influência de um operador para garantir sua correta compactação e, conseqüentemente, a sinergia entre aço e concreto.

Em relação as características físicas do concreto, como a resistência à compressão não apresentou uma influência clara nos resultados de aderência, visto que as diferenças entre f_{c7} foram baixas e a variabilidade de resultados de arrancamento foi considerável. Já com relação a absorção capilar, embora os resultados obtidos não expliquem a diferença entre as formas de aderência, é possível verificar a influência do adensamento em relação este parâmetro físico, que se mostrou prejudicial para os corpos de prova em situação de má aderência, o que explica o desempenho reduzido ao arrancamento nesta situação.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a realização deste trabalho, verificou-se um grande número de trabalhos voltado ao estudo da aderência, entretanto pouco se compreende a influência do adensamento frente à aderência, principalmente na zona de má aderência. Portanto, sugerem-se os seguintes estudos.

- a) Verificar a influência do adensamento nas zonas de boa e má aderência, utilizando diferentes métodos de ensaio, como o modelo de vigas padronizado pela Rilem-Ceb-Fib (1973);
- b) Verificar a influência do correto adensamento mecânico em relação à aderência;
- c) Analisar a influência do adensamento frente propriedades físicas do concreto em diferentes alturas;
- d) Verificar a influência da trabalhabilidade do concreto frente à aderência.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.3R-04 **Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures**. Farmington Hills, Michigan, 2004.

ALMEIDA FILHO, F. M. de; BARRAGÁN, B. E.; CASAS, J. R.; EL DEBS, A. L. H. de C. Variabilidade da aderência e das propriedades mecânicas do concreto auto-adensável. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, 2008. v. 1, n. 1, p. 44-57.

ARAÚJO, J. M. de. **Curso de concreto armado**. 1. ed. Rio Grande: Dunas, 2003. v. 1.

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

_____. NBR 5739: **Concreto - Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 7480: **Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação**. Rio de Janeiro, 2007.

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

_____. NBR 9779: **Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 15575: **Desempenho de edificações habitacionais**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 15823: **Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. NBR 15823: **Concreto autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. NBR 15823: **Concreto autoadensável – Parte 3: Determinação da habilidade passante - Método do anel J**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. NBR NM 52: **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 53: **Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 67: **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

_____. NBR NM 248: **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

CAETANO, L. F. **Estudo do Comportamento da Aderência de Elementos de Concreto Armado em Condições Extremas**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

COSTA, V. C. M. **Influência da corrosão generalizada na aderência e comportamento estrutural de elementos de concreto armado**. Tese de doutorado em Estruturas e Construção Civil. Universidade de Brasília, Brasília, xviii, 180 f., il., 2012.

DUMÊT, T. B. **Aderência de cordoalhas em concretos de alta resistência com e sem fibras de aço**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 490 p., 2003.

EFNARC – European Federation for Specialist Constriction Chemicals and Concrete Systems. **Spacification and guidelines for self-compacting concrete**. In: EFNARC. Fevereiro, 2002

FERNANDES, D. V. **Estudo da aderência de barras de aço coladas ao concreto com resina epóxi**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 162 f., 2011.

FERNANDES, R. M. **A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 155 p., 2000.

FRANÇA, V. H. **Aderência aço-concreto: uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, viii, 127 p , 2004.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1995.

ISA, M. M.; DE CEA, A. A.; RENÓFIO, A. **Aderência entre concreto auto-adensável de alta resistência e armadura**. Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Maringá, v. 26, no. 2, p. 135-139, 2004.

JACINTHO, A. E. P. G. de A.; PIMENTEL, L. L.; BARBOSA, M. P.; FONTANNI, P. S. P. **Aderência aço e concreto: uma contribuição ao estudo do método APULOT usando concreto com borracha**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, São Paulo, v. 7, n. 5, p. 817-844, Out. 2014.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de Concreto: Princípios básicos de dimensionamento de estruturas de concreto armado**. Vol. 1. Rio de Janeiro: Interciência, 1977.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto autoadensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

LOTURCO, B. Sinônimo de construção. **Revista Techné**. São Paulo: Editora PINI, ed. 137, 2008.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

NEVILLE, A. M. **Tecnologia do Concreto** 2ª edição. Porto Alegre: Bookma, 2013.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto e Construções**, São Paulo, jan./mar. 2009, ano 37, n. 53, p. 14-19.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS S.P.; CATOIA, T. CATOIA, B. **Estruturas de concreto – Capítulo 1**, USP – EESC – Dep. Eng. de Estruturas. São Paulo, 2010.

REPETTE, W.L. Concreto auto-adensável - características e aplicação. **Revista Téchné**, São Paulo: Editora Pini, ed. 135, 2008.

REYES, F. E. G. **Análise da aderência entre barras de aço e concretos (CC, CAA E CAAFA), sob influência de ações monotônicas e cíclicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 253 f., 2009.

RIBEIRO, J. L. D. **Análise experimental dos fatores que influenciam a aderência de barras nervuradas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

ROSSI, N. **Resistência de aderência concreto-Aço: efeitos da Resistência à compressão do concreto e do comprimento de aderência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 207 páginas. 2002.

SILVA, B. V.; BARBOSA, M. P.; SILVA FILHO, L. C. P.; LORRAIN, M. S. Investigação experimental sobre o uso de ensaios de aderência aço-concreto para estimativa da resistência à compressão axial do concreto: Parte 1. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v.6, n.5, p.715-736, out. 2013.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Autoadensável**. São Paulo: PINI, 140p., 2008.

TUTIKIAN, B. F., HILGERT, T., HOWLAND, J. J., Comparativo da aderência do concreto com aço sem proteção e o aço galvanizado a quente. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 7, n. 2, p.313-328, abr. 2014.

TUTIKIAN, B. F.; PACHECO, M. Concreto auto adensável (CAA): comparativo entre métodos de dosagem. **Revista IBRACON Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 5, n. 4, p. 500-529, ago. 2012.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Mineral commodity summaries 2016**. Reston, Virginia, 2016. Disponível em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2016.pdf>>. Acesso em: 13 abril de 2018.