



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS RUSSAS**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ERNADE CLÁUDIO NOGUEIRA NUNES**

**ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO DA ANCORAGEM DE BARRAS EM ELE-  
MENTOS DE CONCRETO ARMADO**

**RUSSAS**

**2022**

ERNANDE CLÁUDIO NOGUEIRA NUNES

**ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO DA ANCORAGEM DE BARRAS EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jerfson Moura Lima.

RUSSAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- N924e Nunes, Ernande Cláudio Nogueira.  
Estudo Analítico e Numérico da Ancoragem de Barras em Elementos de Concreto Armado / Ernande Cláudio Nogueira Nunes. – 2022.  
70 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Jerfson Moura Lima.
1. Aderência. 2. Comprimento de Ancoragem. 3. Confinamento. 4. Método dos Elementos Finitos. I.  
Título.

CDD 620

---

ERNANDE CLÁUDIO NOGUEIRA NUNES

ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO DA ANCORAGEM DE BARRAS EM ELEMEN-  
TOS DE CONCRETO ARMADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
banca examinadora da Universidade Federal do  
Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Jerfson Moura Lima (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Msc Jonathas Iohanathan Felipe de Oliveira  
IFCE - Campus Juazeiro do Norte

---

Prof. Paulo Henrique Roberto Moura  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico esse trabalho a Deus e a meus pais, Raimundo e Eva.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pois, sempre esteve comigo me dando força, sabedoria e saúde para seguir em frente.

A minha mãe, Eva, por sempre estar comigo, me apoiando.

Ao meu pai, Raimundo, por todo o esforço que fez e por sempre acreditar em mim.

Aos meus avós, que mesmos em outro plano estarão sempre no meu coração.

Ao Prof. Dr. Lindberg Gonçalves, que com bravura trouxe um campus da UFC para Russas, o que me ajudou a realizar o meu sonho de ser um engenheiro civil.

Ao Prof. Dr. Jerfson Moura Lima, pela ótima orientação e pelas oportunidades únicas de crescimento que me foram dadas.

Aos professores do curso, pelo tempo e esforço dedicados à nossa educação profissional.

Aos colegas da turma pelos momentos felizes que passamos e pelas trocas de experiências.

Quando você quer desistir de alguma coisa, você precisa fazer duas perguntas a si mesmo: Por que quer parar e por que você não conseguiria parar? (CLAMP).

## RESUMO

O princípio de funcionamento do concreto armado está na solidarização entre as barras de aço e o concreto, que, por sua vez, dependerá de muitos fatores, entre eles, está a tensão de aderência e sua correlação com o diâmetro das barras, resistência do concreto e cobrimento. Este trabalho tem por objetivo principal realizar um estudo comparativo entre o comprimento de ancoragem calculado pela NBR 6118:2014 e o comprimento segundo a simulação de um modelo numérico pelo MEF (Método dos Elementos Finitos). Para atingir esse objetivo a pesquisa foi dividida em duas partes, onde na primeira parte foram aplicadas as formulações da NBR 6118:2014 para o cálculo do comprimento de ancoragem e a segunda parte baseou-se no desenvolvimento de modelos numéricos dos corpos de prova da Etapa II do trabalho de Rosales (2016). Para os cálculos dos comprimentos de ancoragem nota-se que o aumento das tensões de compressão do concreto provoca a diminuição do comprimento de ancoragem, em vista do aumento das tensões de aderência. Após as simulações pode-se perceber para um mesmo diâmetro de corpo de prova de concreto, ao passo que as bitolas das barras crescem, as tensões máximas de arrancamento vão decrescendo, visto que se associam a cobrimentos de camadas de concreto cada vez menores. Então, o aumento do confinamento passivo de concreto é diretamente proporcional ao aumento das tensões de aderência, desse modo, percebe-se que maiores resistências ou camadas de concreto provocam uma diminuição no comprimento de ancoragem.

**Palavras-chave:** aderência; comprimento de ancoragem; confinamento; método dos elementos finitos.

## ABSTRACT

The working principle of reinforced concrete is in the solidarization between the steel bars and the concrete, which, in turn, will depend on many factors, among them, is the bond stress and its correlation with the diameter of the bars, concrete strength and cover. This work has as main objective to perform a comparative study between the anchorage length calculated by NBR 6118:2014 and the length according to the simulation of a numerical model by FEM (Finite Element Method). To achieve this objective, the research was divided into two parts, where the first part applied the formulations of NBR 6118:2014 to calculate the anchorage length and the second part was based on the development of numerical models of specimens from Stage II of the work of Rosales (2016). For the calculations of the anchorage lengths it is noted that the increase of the compression stresses of the concrete causes the decrease of the anchorage length, in view of the increase of the bond stresses. After the simulations, for the same diameter of concrete specimen, as the bar sizes increase, the maximum pullout stresses decrease, which is expected, since it is associated to smaller and smaller concrete layers. Then, the increase of the passive concrete confinement is directly proportional to the increase of the adherence tensions, in this way, it is perceived that bigger resistances or layers of concrete provoke a decrease in the anchorage length.

**Keywords:** adherence; anchorage length; confinement; finite element method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Comportamento de uma viga de concreto com apoios simples.....	7
Figura 2.2 - Acabamentos superficiais das barras de aço.....	10
Figura 2.3 - Aderência por adesão.....	11
Figura 2.4 - Aderência por atrito – Modificado de Muzardo .....	12
Figura 2.5 – Rugosidade superficial das barras de aço.....	12
Figura 2.6 – Aderência mecânica .....	13
Figura 2.7 – Forças atuantes em uma barra nervurada .....	13
Figura 2.8 – Transferência de esforços aço-concreto e fendilhamento .....	14
Figura 2.9 – Condições de boa e de má aderência em vigas de concreto armado.....	16
Figura 2.10 – Tipos de ganchos em barras .....	18
Figura 2.11 – Dimensões dos corpos de prova.....	21
Figura 2.12 – Variação das forças e tensões máximas .....	22
Figura 2.13 – Curvas de tensão de aderência <i>versus</i> deslizamento. (a) CP com barras de $\phi$ 10 mm, (b) CP com barras de $\phi$ 12 mm.....	24
Figura 2.14 – Curvas de tensão de aderência <i>versus</i> deslizamento. (a) CP de $\phi$ 100 mm com barras de $\phi$ 8 mm (100_8), (b) CP de 200 mm com barras de $\phi$ 8 mm (200_8).....	25
Figura 2.15 – Curvas de tensão de aderência <i>versus</i> deslizamento. (a) CP prismáticos de com barras de $\phi$ 8 mm (CPP_8), (b) CP prismáticos com barras de $\phi$ 10 mm (CPP_10).....	26
Figura 2.16 – Esquema detalhado e foto dos CPs <i>pull-out</i> recém moldados .....	27
Figura 2.17 – Esquema detalhado e foto dos CPs <i>push-out</i> recém moldados .....	27
Figura 2.18 – Distribuições de tensões e deformações: a) compressão b) tração. ....	34
Figura 2.19 – Malha de elementos finitos e geometria empregada na análise .....	35
Figura 3.1 – Comprimento de ancoragem básico .....	38
Figura 3.2 – Comprimento de ancoragem necessário .....	40
Figura 3.3 – Representação do equilíbrio de esforços no concreto armado .....	42
Figura 3.4 – Gráfico das forças de arranchamento encontradas em laboratório .....	43
Figura 4.1 – Características físicas dos modelos.....	46
Figura 4.2 – Condição de contorno essencial dos modelos numéricos .....	47
Figura 4.3 – Modelos numéricos das simulações .....	48
Figura 4.4 – Diagramas tensão-deformação para aço em armaduras passivas.....	49
Figura 4.5 – Modelo do CP 150 mm .....	51
Figura 4.6 – Modelo da união entre barra e corpo de concreto.....	51

Figura 4.7 – Condição de Contorno e restrição de movimento em vermelho .....	52
Figura 4.8 – Malhas da barra de 10 mm e do CP de 150 mm .....	52
Figura 4.9 – Barras de 8, 10 e 12,5 mm com CP de 100 mm.....	53
Figura 4.10 – Barras de 8, 10 e 12,5 mm com CP de 150 mm.....	55
Figura 4.11 – Tensão vs comprimento de ancoragem para CP de 100 mm .....	56
Figura 4.12 – Tensão vs comprimento de ancoragem para CP de 150 mm .....	57
Figura 4.13 – Distribuição de tensões nas barras para CP de 100 e 150 mm.....	58
Figura 4.14 – Distribuição de tensões nos CPs de 100 mm .....	59
Figura 4.15 – Distribuição de tensões nos CPs de 150 mm .....	61
Figura 4.16 – Distribuição de tensões no concreto para CP de 100 mm.....	63
Figura 4.17 – Distribuição de tensões no concreto para CP de 150 mm.....	63
Figura 4.18 – Representação em corte da distribuição de tensões nos CPs .....	64
Figura 4.19 – Representação da distribuição de tensões nos CPs .....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Diâmetro de dobramentos das barras.....	19
Tabela 2.2 – Propriedades físicas dos concretos A e B .....	21
Tabela 2.3 – Propriedades físicas do aço.....	21
Tabela 2.4 – Dados experimentais dos ensaios da etapa II .....	23
Tabela 2.5 – Resistências máximas dos CP no estudo do efeito de forma.....	24
Tabela 2.6 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial do concreto.....	28
Tabela 2.7 – Resultados dos ensaios de aderência ( <i>pull-out e push-out</i> ) .....	28
Tabela 2.8 – Traços Finais.....	29
Tabela 2.9 – Comprimento de ancoragem.....	29
Tabela 2.10 – Resultados do ensaio APULOT.....	30
Tabela 2.11 – Dados experimentais.....	31
Tabela 3.1 – Coeficientes para o cálculo da tensão de aderência.....	36
Tabela 3.2 – Tensões de Aderência do Concreto .....	37
Tabela 3.3 – Comprimentos de ancoragem básicos .....	38
Tabela 3.4 – Comprimentos mínimos de ancoragem .....	39
Tabela 3.5 – Comprimentos de ancoragem necessários para $\alpha = 1,0$ .....	40
Tabela 3.6 – Forças de arrancamento .....	43
Tabela 4.1 – Quantidade de elementos finitos por modelo numérico .....	47
Tabela 4.2 – Características mecânicas do concreto B.....	49
Tabela 4.3 – características mecânicas das barras de aço.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APULOT	Appropriate Pull-Out Test
ARI	Alta Resistência Inicial
Ccs	Coefficiente de conformidade superficial
CP	Cimento Portland
CPP	Corpo de Prova Prismático
FRP	Barra de Fibra Polimérica
MEF	Método dos Elementos Finitos
MPa	MegaPascal
NBR	Norma Brasileira
PET	Poli Tereftalato de Etila
RILEM	The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials (A União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais de Construção)
RNA	Redes Neurais Artificiais

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>3</b>
1.2.1	Objetivo Geral .....	3
1.2.2	Objetivos Específicos .....	3
<b>1.3</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4</b>	<b>Organização do trabalho.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1</b>	<b>Aderência aço-concreto .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2</b>	<b>Causas que alteram a aderência .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3</b>	<b>Fatores que influenciam na aderência .....</b>	<b>9</b>
<b>2.4</b>	<b>Tipos de aderência .....</b>	<b>10</b>
2.4.1	Aderência por Adesão .....	10
2.4.2	Aderência por Atrito.....	11
2.4.3	Aderência Mecânica .....	12
<b>2.5</b>	<b>Modos de ruptura aço-concreto.....</b>	<b>14</b>
<b>2.6</b>	<b>Aderência e ancoragem – ABNT NBR 6118:2014 .....</b>	<b>15</b>
2.6.1	Tensão de Aderência .....	15
2.6.2	Comprimento de ancoragem .....	17
2.6.3	Comprimento de ancoragem .....	19
<b>2.7</b>	<b>Alguns estudos da literatura .....</b>	<b>20</b>
2.7.1	Análise numérica - experimental do comportamento da aderência aço-concreto – Rosales (2016).....	20
2.7.2	Comparativo experimental entre os métodos de ensaios pull-out e push-out para determinação da tensão de aderência aço-concreto – Brisotto (2012) .....	26
2.7.3	Estudo da Aderência entre Concreto e Aço pelo Ensaio Apulot Utilizando Concreto de Alta Resistência – Martins <i>et al</i> (2014) .....	29
2.7.4	Aplicação de redes neurais artificiais na predição da aderência aço-concreto em ensaios do tipo pull-out – Lorenzi <i>et al</i> (2017) .....	31
<b>2.8</b>	<b>Modelagem numérica .....</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>ANÁLISE DO COMPRIMENTO DE ACONRAGEM CONFORME ABNT NBR 6118:2014 .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Tensão de aderência.....</b>	<b>36</b>
<b>3.2</b>	<b>Comprimento de ancoragem básico.....</b>	<b>37</b>

<b>3.3</b>	<b>Comprimento de ancoragem necessário .....</b>	<b>39</b>
<b>3.4</b>	<b>Forças de aderência .....</b>	<b>41</b>
<b>3.5</b>	<b>Considerações finais .....</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Aspectos gerais da modelagem .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>MALHAS DOS ELEMENTOS .....</b>	<b>47</b>
<b>4.3</b>	<b>Modelos constitutivos .....</b>	<b>48</b>
4.3.1	Concreto .....	48
4.3.2	Aço .....	49
4.3.3	Interface.....	50
4.3.4	Construção de modelos no ABAQUS .....	50
<b>4.4</b>	<b>Resultados da modelagem .....</b>	<b>53</b>
4.4.1	Efeito do diâmetro da barra .....	53
4.4.2	Efeito do diâmetro dos corpos de prova .....	59
<b>4.5</b>	<b>Considerações finais .....</b>	<b>64</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>66</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de concreto e aço como materiais na construção civil já remonta à séculos, contudo sua combinação, para a criação do concreto armado, é muito mais recente. A união desses dois materiais buscou agregar em um só compósito suas melhores características, o desempenho do aço quando submetido aos esforços de tração e do concreto quando solicitado à compressão.

O princípio de funcionamento do concreto armado está na solidarização entre as barras de aço e o concreto, que, por sua vez, dependerá de muitos fatores, entre eles, está a tensão de aderência e sua correlação com o diâmetro das barras, resistência do concreto e cobrimento. A saúde da ligação entre aço e concreto é quem vai condicionar o desempenho do concreto armado.

Devido as propriedades do concreto e do aço serem diferentes, o comportamento na interface que de cada um apresenta é diferente. Portanto, torna-se indispensável compreender o comportamento do concreto armado sob a ação de cargas e as propriedades da interface, uma vez que ter esses conhecimentos são fundamentais no entendimento do desempenho das estruturas. Ter em mãos o conhecimento sobre as propriedades da interface é fundamental para a definição e aplicação das normas de cálculo com prescrições relacionadas a ancoragem e emendas por transpasse das barras de aço, por exemplo (ROSALES, 2016).

Para Almeida (2005), a análise pode ser um importante procedimento para a verificação da integridade e da segurança da estrutura, ou seja, uma maneira de identificar e localizar danos, além de detectar mudanças na sua deformabilidade. Os resultados experimentais podem ser comparados aos resultados obtidos por meio de simulação computacional em programas baseados no Método dos Elementos Finitos e na Mecânica do Dano.

Para analisar o comportamento mecânico de estruturas de concreto armado, muitas pesquisas usam métodos computacionais pelos grandes benefícios que oferecem na solução de modelos matemáticos difíceis de resolver analiticamente. Entre esses métodos o mais usado é o Método dos Elementos Finitos (MEF) devido a vantagens como a versatilidade de modelar geometrias complexas, materiais heterogêneos e não lineares. Uma vez de que o concreto armado é um material heterogêneo pela presença de dois materiais (considerando o concreto e o aço) com comportamentos mecânicos diferentes, existem descontinuidades que devem ser levadas em conta no MEF (ROSETO, 2018).

Conforme afirma Santana (2014) o cobrimento do concreto pode influenciar na tensão última de aderência e a forma de ruptura do concreto. Aumento nas espessuras de concreto

que envolvem as barras de aço provocam aumento na tensão de aderência, conseqüentemente na diminuição do comprimento de ancoragem. Em menores cobrimentos a tendência é que ocorra o desenvolvimento de fissuras com as tensões radiais provocando o fendilhamento do concreto. Por outro lado, para cobrimentos maiores, além de provocar o aumento do confinamento nas barras, a ruptura se dará por escoamento da barra ou arrancamento, havendo esmagamento do concreto nos locais próximos as nervuras.

Apesar de várias pesquisas apontarem a forte influência do confinamento passivo nas tensões de aderência, por conseguinte no comprimento de ancoragem a NBR 6118:2014 ainda não considera esse parâmetro nas suas formulações para calcular o comprimento de ancoragem, dependendo somente de fatores como as condições de boa ou má aderência, a resistência a compressão do concreto e diâmetro das barras. Trabalhos, por exemplo, como o de Pereira (2021) que teve por objetivo analisar a precisão de resultados obtidos por meio de aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF) na simulação numérica de vigas de concreto armado. Investigou a influência da escolha de modelos constitutivos e ajustes de parâmetros nos resultados das simulações. Verificou que a precisão da simulação depende diretamente da definição dos modelos e ajustes adotados na modelagem.

## **1.1 Justificativa**

A forma como utilizam-se os recursos e os materiais é de importância fundamental para a indústria, sobretudo, da construção civil. Deve-se buscar sempre evitar desperdícios, diminuir a produção de resíduos e os gastos desnecessários como materiais.

Pensar no uso mais racional do aço em estruturas de concreto armado possibilita atingir um bom nível de economia sem deixar de lado a segurança e o conforto. Primeiramente, por meio deste trabalho é possível perceber a economia de aço que pode ser gerada através da redução do comprimento de ancoragem. Em segundo lugar, o melhor conhecimento sobre a interação entre aço e concreto permite a utilização desses materiais de forma mais racional.

Além disso, as normas vigentes sobre estruturas de concreto armado primordialmente pela questão de segurança tendem a superdimensionar elementos e valores, como, por exemplo, o comprimento de ancoragem utilizados em barras de aço para a confecção de uma viga.

Será avaliado a influência do confinamento passivo do concreto sobre as barras nos cálculos do comprimento de ancoragem, fato este que a NBR 6118:2014 é mais simplista, não

havendo nenhuma consideração com relação as camadas de concreto sobre as barras e o aumento de tensões de aderência, conseqüentemente, a diminuição do comprimento de ancoragem.

Com os avanços tecnológicos surgiu os modelos numéricos, permitindo analisar o comportamento de elementos estruturais de forma mais rápida e econômica. Através desses modelos é possível medir diversos parâmetros. Ferramentas computacionais, como, por exemplo, o ABAQUS, e a modelagem pelo Método dos Elemento Finitos (MEF), possibilitam avaliar informações importantes, como a determinação e análise dos campos de tensões e deformações em corpos de concreto, impossíveis de se avaliarem em ensaios de laboratório.

As simulações numéricas, entretanto, devem ser validadas com resultados de ensaios experimentais. Em grande parte, o sucesso de uma simulação vai depender do aperfeiçoamento do modelo numérico e das informações dos materiais. Por outro lado, entre as vantagens, estão a redução do tempo e do custo se comparado a ensaios de laboratório.

A motivação desse trabalho vem da verificação do comprimento de ancoragem realmente necessário das barras de aço em estruturas de concreto armado. E, dessa forma contribuir para um pensamento mais criterioso na utilização de matérias da construção civil e na validação de modelos numéricos capazes de simular estruturas reais.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

- Realizar um estudo do comprimento de ancoragem calculado segundo a NBR 6118:2014 e segundo a simulação de um modelo numérico pelo MEF.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Aplicar as formulações da NBR 6118:2014 para a determinação do comprimento de ancoragem com diferentes diâmetros de barras e de resistências de concreto;
- Comparar as forças de “arrancamento” obtidas nos ensaios experimentais de Rosales (2016) e as calculadas segundo a NBR 6118:2014;
- Desenvolver um modelo tridimensional via Método dos Elementos Finitos para simular o ensaio de arrancamento realizado por Rosales (2016);
- Realizar análise numérica do modelo construído relacionando o comprimento de ancoragem com a variação do diâmetro das barras e do cobrimento de concreto;
- Comparar os resultados obtidos pelo método da NBR 6118:2014 e pelo método numérico.

### **1.3 Metodologia**

Inicialmente foi realizado um breve estudo sobre a aderência entre aço-concreto e sobre as prescrições da NBR 6118:2014 acerca do comprimento de ancoragem através de uma pesquisa bibliográfica.

Em busca dos objetivos, este trabalho foi dividido nas seguintes etapas:

Na primeira etapa foram aplicadas as formulações da NBR 6118:2014 para o cálculo do comprimento de ancoragem, onde, inicialmente, foram obtidas as tensões de aderência, por meio das tensões de tração do concreto, segundo a norma, para diferentes resistências a compressão, ver Tabela 3.2. Consideram-se para os cálculos barras nervuradas com diâmetros comerciais de até 32 mm em situação de má aderência. Depois foram realizados estudos paramétricos variando-se o diâmetro das barras e a resistência do concreto à compressão e seus efeitos no comprimento de ancoragem. Ainda nesta etapa, procurou-se observar as implicações que a variação da relação entre as áreas de aço (a efetivamente utilizada e a calculada) têm no comprimento de ancoragem das barras. Por fim, buscou-se comparar as forças de arrancamento máximas obtidas experimentalmente por Rosales (2016) com àquelas das formulações da NBR 6118:2014.

A segunda parte deste estudo baseou-se no desenvolvimento de modelos numéricos dos corpos de prova da Etapa II do trabalho de Rosales (2016) compostos pela união dos elementos de barra de aço (8, 10 e 12,5 mm) e corpo cilíndrico de concreto com diâmetros de 100 e 150 mm. A modelagem e simulação numérica foram realizadas com o *software* ABAQUS 6.14. Foram analisados ao todo seis modelos numéricos, três modelos com corpos de prova de 100 mm e três com 150 mm de diâmetro. Buscou-se através dos resultados das simulações observar os efeitos da variação dos diâmetros das barras e das tensões de confinamento na distribuição de tensões ao longo do comprimento de ancoragem nas barras de aço e no concreto.

### **1.4 Organização do trabalho**

Este trabalho está organizado em 5 capítulos. Onde no primeiro capítulo está uma introdução sobre o tema, breves considerações sobre os assuntos abordados, justificativa, objetivos e metodologia do trabalho.

O segundo capítulo irá tratar de uma breve revisão bibliográfica sobre os temas importantes para desenvolvimento deste trabalho como: aspectos sobre aderência aço-concreto, as causas que afetam a aderência, os tipos de aderência e as relações com a ancoragem, algumas

pesquisa de outros trabalhos na mesma área, o cálculo do comprimento de ancoragem segundo NBR 6118:2014 e aspectos gerais da Modelagem com Elemento Finitos (MEF).

No terceiro capítulo será discutido sobre o comprimento de ancoragem segundo a NBR 6118:2014. Iniciando com o cálculo das tensões de aderência, em seguida o comprimento de ancoragem básico e necessário para uma boa transmissão de esforços entre aço e concreto. Por fim um comparativo entre as forças de aderência encontradas nos ensaios de laboratório do trabalho de Rosales (2016) e aquelas calculadas segundo a norma.

No quarto capítulo serão apresentados o desenvolvimento dos modelos numéricos e os resultados obtidos após simulações realizadas. Será feito inicialmente uma descrição da construção dos modelos no *software* utilizado seguido dos resultados obtidos com relação aos efeitos dos diâmetros das barras e dos diâmetros dos corpos de concreto.

Por fim, no capítulo cinco, serão tratadas as conclusões com a análise dos resultados. Será discutido também sobre a importância desse estudo para o conhecimento da interação dos dois principais materiais do concreto armado e os benefícios econômicos que se pode obter com um conhecimento mais profundo a interação entre aço-concreto no comprimento de ancoragem.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item serão apresentadas as definições de aderência aço-concreto, prescrições normativas, os tipos e mecanismos de aderência, os fatores que a influenciam, os modos de ruptura do concreto, a aderência e ancoragem segundo a NBR 6116:2014 e alguns estudos da literatura sobre a aderência entre aço e concreto.

### 2.1 Aderência aço-concreto

Segundo Brisotto (2011), o concreto armado é um material que tem seu comportamento estrutural primordialmente dependente da aderência entre concreto e armadura. É esta propriedade que garante a transferência de esforços entre os materiais e a compatibilidade de deformação entre eles. Se, por acaso, a aderência não existisse então a transmissão das tensões não ocorreria, logo as barras de aço deslizariam sem encontrar nenhuma resistência, e, por conseguinte não teria como elas acompanharem a deformação do concreto.

Devido a alguns fatores, seja relacionado a execução da peça, seja pelas características dos próprios materiais que as compõem, na execução do concreto armado sempre irá existir descontinuidades locais, espaços vazios e sem aderência que provocam deslocamentos diferenciais entre a armadura e o concreto. Conforme Fernandes (2000), uma das principais contribuições da aderência para o concreto armado é garantir uma boa capacidade de utilização da estrutura, através da limitação da abertura de fissuras e uma melhor distribuição dessas ao longo da peça, podendo evitar flechas excessivas e rupturas localizadas.

De forma inicial diante das solicitações o concreto e o aço trabalham de forma conjunta em vista do processo de aderência. Nesta primeira etapa é considerada uma ligação perfeita entre os materiais sob a ação das cargas. Uma vez que o processo de fissuração começa a ocorrer as barras de aço absorvem as tensões de forma mais irregular ao longo da peça (ROSALLES, 2016). A dinâmica presente na superfície de interface da armadura e do concreto é bastante complexa, contudo, o que se sabe é que quanto maior o número descontinuidades menor a superfície disponível para a transferência de esforços dos elementos em questão.

Sob uma ótica mais geral, ter uma boa aderência significa que as deformações da armadura e do concreto serão praticamente iguais ao longo da peça, corroborando com as hipóteses das seções planas de Bernoulli e os processos de cálculo dos esforços compatíveis com estas deformações (CAETANO, 2008). Contudo, localmente, o comportamento é mais complexo, pois há a presença de descontinuidades, como as fissuras, nelas as deformações do aço mostram-se maiores à do concreto, bem como seus respectivos deslocamentos.

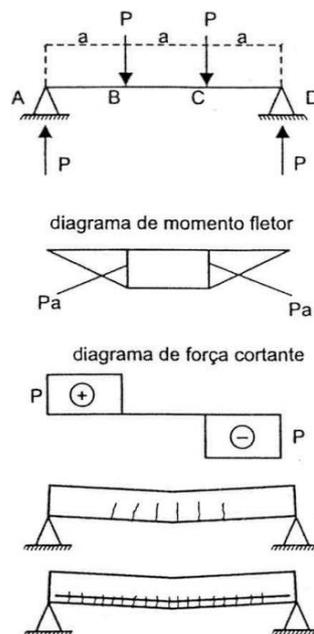
A tensão de aderência pode ser medida de forma estimada através de expressões de cálculo presentes em normas e metodologias de ensaios feitos de laboratórios, além de modelos matemáticos desenvolvidos. De forma simples essa tensão de aderência nada mais é que o valor de resposta das tensões que surgem devido as solicitações na interface aço-concreto (ROSALLES, 2016).

Em definição mais concisa,

A aderência acaba por se traduzir num mecanismo de transferência de tensões que existe na interface entre a barra de aço da armadura e o concreto que a envolve. Esse fenômeno é tão importante, que a própria definição de concreto armado se condiciona à sua existência. A forma usual de consideração dessa ligação tem sido por meio da definição de uma “tensão de aderência”, e sua distribuição ao longo da interface tem sido exaustivamente investigada, já que seu conhecimento é essencial para a compreensão do comportamento de ancoragens retas, dos ganchos e das emendas (FERNANDES, 2000).

Entender como se dá o processo de aderência não é somente para melhor compreensão do funcionamento e do comportamento do concreto armado, mas também da extrema importância dela quando se fala no emprego das ancoragens, assunto que será tratado mais a frente.

Figura 2.1 - Comportamento de uma viga de concreto com apoios



Fonte: Carvalho (2021).

As principais características das estruturas de concreto armado são os materiais trabalhando em conjunto devido à aderência e à possibilidade de ocorrência de regiões fissuradas

de concreto. Estes dois princípios básicos estarão sempre presentes nas discussões e considerações sobre o tema (CARVALHO, 2021).

A ancoragem da armadura, sobretudo, o seu comprimento está diretamente ligado as tensões de aderência. Busca-se por meio da ancoragem o equilíbrio das forças atuantes e o travamento das barras de aço, com objetivo de evitar o escorregamento da armadura, reduzindo a abertura de fissuras e melhorando em reposta a distribuição das tensões solicitantes ao longo da peça.

Caetano (2008) afirma que,

A eficiência da ligação aço-concreto costuma ser convenientemente quantificada através da relação *tensão versus deslizamento*, a qual expressa o deslizamento relativo esperado quando se aplica uma determinada tensão na interface. Deslizamentos pequenos indicam danos locais ou acomodações da interface. Quando se incrementam, indicam a destruição da aderência.

Valores limites de deslizamentos estão estabelecidos nas normas, sendo associados a um determinado estado de deformação e fissuração inaceitável. Como já dito, o estudo da transmissão dos esforços de tração nas barras é complexo, então recorre-se muitas vezes a modelagem numérica a partir dos resultados obtidos de ensaios de laboratório. Um dos ensaios mais utilizados para alimentar os modelos numéricos é o *pull-out*, ou também chamado de arrancamento centrado (CAETANO, 2008).

## 2.2 Causas que alteram a aderência

Segundo Fernandes (2000) as principais causas da variação das tensões de aderência são as que seguem:

- Ações externas: influenciam alterações das tensões de tração e compressão no aço;
- Fissuras: acarretam um acréscimo de tensões na armadura aumentando, por conseguinte, as tensões de aderência;
- Forças de ancoragem nas extremidades das barras: pelas tensões de aderência, a força atuante na barra é transferida ao concreto;
- Variações de temperatura: a maior condutibilidade térmica do aço induz a uma deformação maior das barras de aço em relação ao concreto, elevando as tensões de aderência e podendo ocasionar a ruptura do cobrimento;
- Retração do concreto: é impedida pela barra de aço, ocasionando tensões de tração no concreto e tensões de compressão na armadura;

- Deformação lenta do concreto em peças comprimidas de concreto armado (pilares): devido ao encurtamento causado pela deformação lenta, a armadura sofre um acréscimo de tensões de compressão, aliviando o concreto.

### 2.3 Fatores que influenciam na aderência

Dentre os diversos fatores que podem influenciar na variação da tensão de aderência aço-concreto, Tavares (2012) destaca entre elas:

- A Resistência mecânica do concreto: quanto maior a resistência mecânica do concreto, maiores serão os esforços de aderência que o concreto poderá suportar na interface. A resistência à compressão do concreto é um fator decisivo quando a ruptura da aderência é por deslizamento. Já a resistência à tração do concreto influencia a ruptura da aderência por fendilhamento que ocorre quando as tensões circunferenciais de tração alcançam ou excedem a resistência à tração do concreto.
- O Diâmetro das barras de aço: o diâmetro da barra de aço afeta a área superficial de aderência. Tal fato é justificável pela espessura da zona de transição, mais grossa nas barras de maior diâmetro. Se o cobrimento e o comprimento aderente forem mantidos proporcionais ao diâmetro das barras, o diâmetro não tem relevância direta no comportamento da ligação aço-concreto.
- O Cobrimento de concreto ao redor das barras de aço: influencia o cone de fissuração formado ao redor da barra de aço. Quanto maior for o cobrimento, maior será o grau de confinamento e, conseqüentemente, maior a tensão de aderência. Sem pressão transversal externa ou sem armadura transversal suficiente, um cobrimento de aproximadamente três vezes o diâmetro da barra parece ser suficiente para admitir ruptura por deslizamento.

Além destas, outras fontes que podem influenciar no comportamento da aderência são a classe do aço, a tensão de escoamento do aço (se houver escoamento da armadura), o cobrimento e espaçamento da armadura, o tipo e geometria da nervura, os efeitos de confinamento, a quantidade e posição da armadura transversal, a posição da armadura em relação à concretagem; a repetição do carregamento, número de ciclos e amplitude do carregamento cíclico; o tipo, a velocidade e duração do carregamento; as variações de temperatura e estado superficial da armadura (FERNANDES, 2000).

## 2.4 Tipos de aderência

O bom desempenho do concreto armado está condicionado a solidarização dos esforços entre aço e concreto. A ligação, no entanto, entre esses materiais é constituída de várias parcelas, as quais não podem ser estudadas separadamente devido à complexidade dos fatores envolvidos nessa conexão.

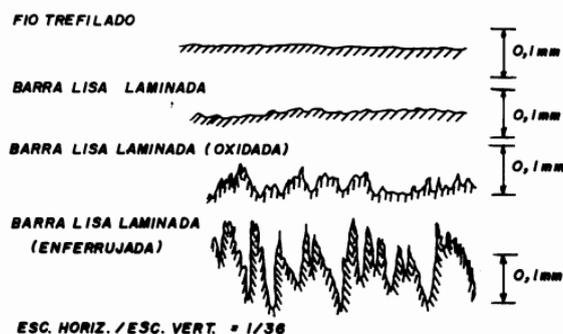
Esquemáticamente, a aderência pode ser decomposta em três parcelas: adesão, atrito e aderência mecânica. Dessas parcelas decorrem de diferentes fenômenos que intervêm na ligação dos dois materiais (MUZARDO; PINHEIRO, 2003). Essa divisão classificatória é um recurso para entender melhor os mecanismos no desenvolvimento da aderência, pois não é possível obter valores puros de cada uma dessas componentes devido a uma complexa correlação entre elas.

No caso das barras lisas, a ligação deve-se fundamentalmente a aderência por adesão química e aderência por atrito. Para este tipo de barras a aderência mecânica pode ser desprezada, dado que não existe o travamento mecânico que proporcionam as nervuras. No caso das barras nervuradas, essas parcelas podem ser desprezadas, pois a aderência neste caso logra-se fundamentalmente pela aderência mecânica que ocorre entre o concreto e as nervuras da barra de aço (ROSALES, 2016).

### 2.4.1 Aderência por Adesão

De acordo com Muzardo (2003) e Tavares (2012) esta parcela de aderência é caracterizada por uma resistência à separação dos dois materiais. Durante as reações de hidratação do cimento ocorre ligações físico-químicas na zona de interface das barras com a pasta, criando-se uma força intramolecular que a princípio unem os materiais. Essa ligação é de natureza frágil, uma vez que para pequenos deslocamentos relativos ela é facilmente desfeita. A ligação dependerá da rugosidade e da limpeza da superfície da barra de aço.

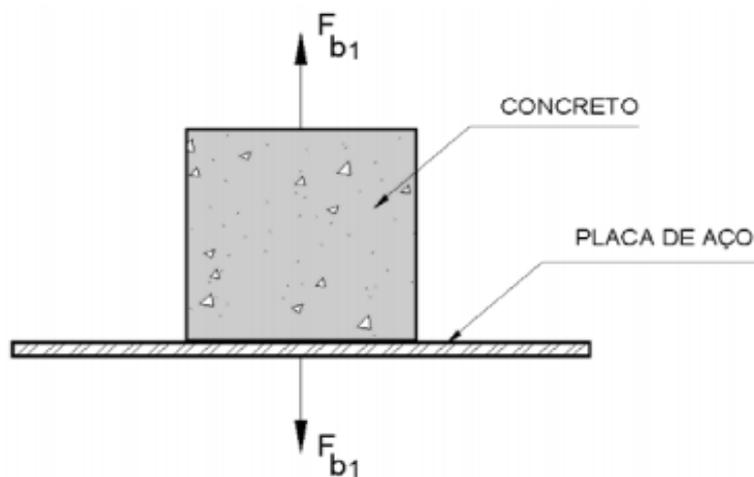
Figura 2.2 - Acabamentos superficiais das barras de aço



Fonte: Fusco (1995).

Por meio da imagem a seguir é possível ver como se comportará da ligação por adesão. A imagem é composta por um bloco de concreto e uma placa de aço. Com objetivo de separar a ligação entre estes dois materiais é necessário a aplicação de uma força  $F_{b1}$ . A aplicação da força de forma vertical garante a obtenção dos valores de adesão pura, ao passo que se fosse aplicada uma força horizontal não seria possível dissociar a adesão da ligação por atrito. Cabe ressaltar, sobretudo, que as ligações adesivas sempre estão presente nesse tipo de compósitos.

Figura 2.3 - Aderência por adesão



Fonte: Muzardo (2003).

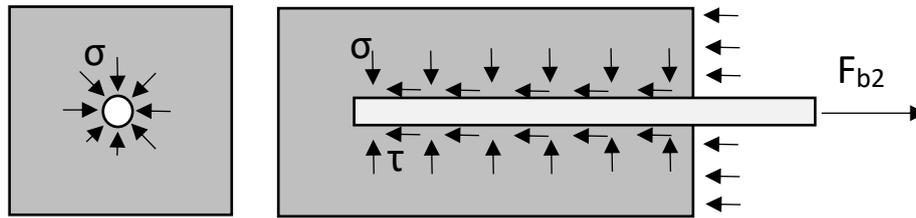
#### 2.4.2 Aderência por Atrito

Esta parcela da aderência está associada há pequenos deslocamentos relativos entre aço e concreto. Então essa movimentação manifestará o surgimento da resistência de atrito (ROSALES, 2016).

A rugosidade da barra e a tensão de confinamento ( $\sigma$ ) exercida pelo concreto sobre a barra são fatores que influenciam nas tensões de atrito presentes nessa ligação. Por exemplo, em regiões de apoio de vigas em pilares há acréscimos de tensões de contato que por sua vez contribuem para o aumento da aderência entre essas peças (MUZARDO, 2003).

Por meio de um ensaio de arrancamento com a aplicação de  $F_{b2}$  (Figura 2.4), pode se obter a informação de que a força necessária para subtrair a barra de aço do concreto é composta majoritariamente pelo atrito, isto é,  $F_{b2}$  é maior que  $F_{b1}$ . Portanto, a ligação por meio da adesão compõe apenas inicialmente a resistência ao carregamento que provoca o deslocamento dos elementos. Após essa fase inicial, a resistência ao deslocamento da barra se dá por meio do atrito e posteriormente pelo fator mecânico.

Figura 2.4 - Aderência por atrito – Modificado de Muzardo



Fonte: Autor.

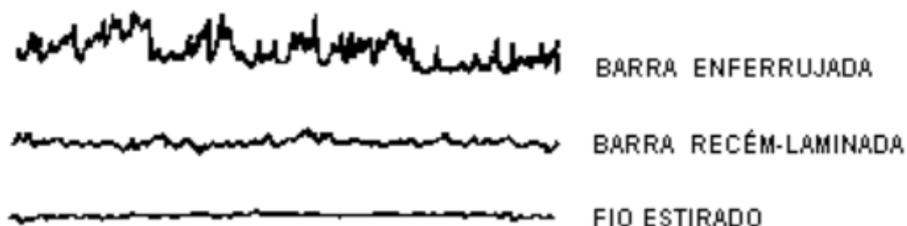
O coeficiente de atrito entre aço e concreto é alto, em função da rugosidade da superfície das barras, resultando valores entre 0,3 e 0,6 (LEONHARDT *apud* MUZARDO, 2003).  $(\tau_b)$  é a resultante das tensões de aderência distribuídas ao longo da barra.

### 2.4.3 Aderência Mecânica

Segundo Rosales (2016) e Muzardo (2003) esta parcela de aderência é consequência da conformação superficial das barras de aço, devido a presença das saliências (nervuras). A conformação se traduz por meio de um coeficiente de conformidade superficial ( $C_{cs}$ ), número este que caracteriza a aderência com o concreto. Mesmo para barras lisas podem apresentar aderência mecânica devido a rugosidade da sua superfície. O valor do coeficiente é determinado experimentalmente tomando-se como base a aderências das barras lisas.

Como forma de se entender melhor esse aspecto de rugosidade abaixo está a comparação as superfícies microscópicas das barras de aço em diferentes situações. Sabe-se mesmo com os processos de fabricação e cuidados mais atuais, as superfícies do aço utilizado na construção sempre apresentarão rugosidades como na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Rugosidade superficial das barras de aço



Fonte: Muzardo (2003).

A aderência mecânica é causada pelas nervuras que criam dentes no concreto. A formação dos consoles leva a concentração das forças de compressão perpendiculares as nervuras à medida que ocorre solicitações na barra e tende ao deslocamento (ROSALES, 2016).

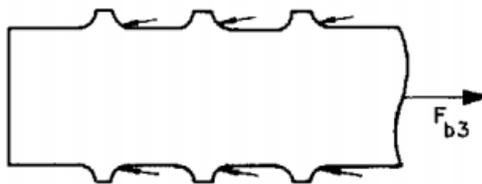
Para Caetano (2008),

Em barras lisas, como seria de esperar, a contribuição desta parcela é muito pequena, diferentemente do que ocorre no caso de barras nervuradas, onde a mesma assume grande importância e se torna fundamental para o desempenho global da aderência, se constituindo na principal responsável pela ancoragem da barra de aço ao concreto.

Figura 2.6 – Aderência mecânica



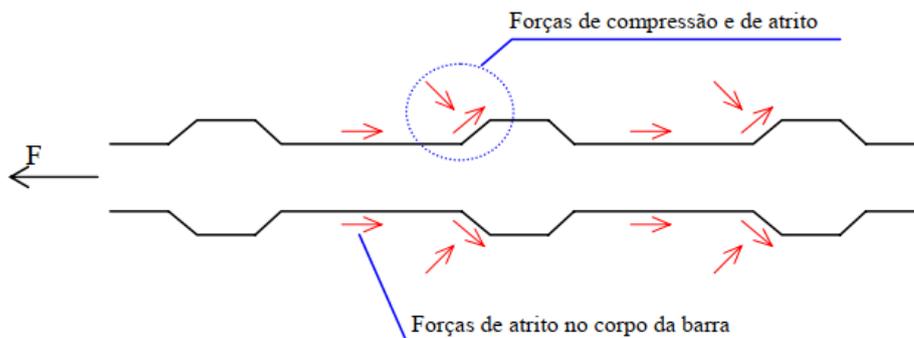
Fonte: TAVARES (2012).



Fonte: Muzardo (2003).

As propriedades geométricas e a distância entre as nervuras são decisivas para se obter o valor da resistência de aderência. A área de contato entre os consoles do concreto existentes entre as nervuras e a superfície lateral funcionam como pontos de apoio para receberem as tensões de compressão no concreto, figura acima (TAVARES, 2012). Nesses locais o estado de tensão ocasiona o aparecimento de microfissuras e o micro esmagamento do concreto. Este é o mecanismo de ligação mais efetivo, possibilitando a ao aço ser solicitado em sua máxima resistência.

Figura 2.7 – Forças atuantes em uma barra nervurada



Fonte: CAETANO (2008).

A aderência mecânica é a parcelas dentre elas com a maior contribuição na resistência total de aderência, pois a força  $F_{b3}$  (mecânica) necessária ao arrancamento da barra é muito maior do que a  $F_{b2}$  (atrito) que por sua vez é maior do que a  $F_{b1}$  (adesão) (ROSSI, *apud* SIGNORI, 2018).

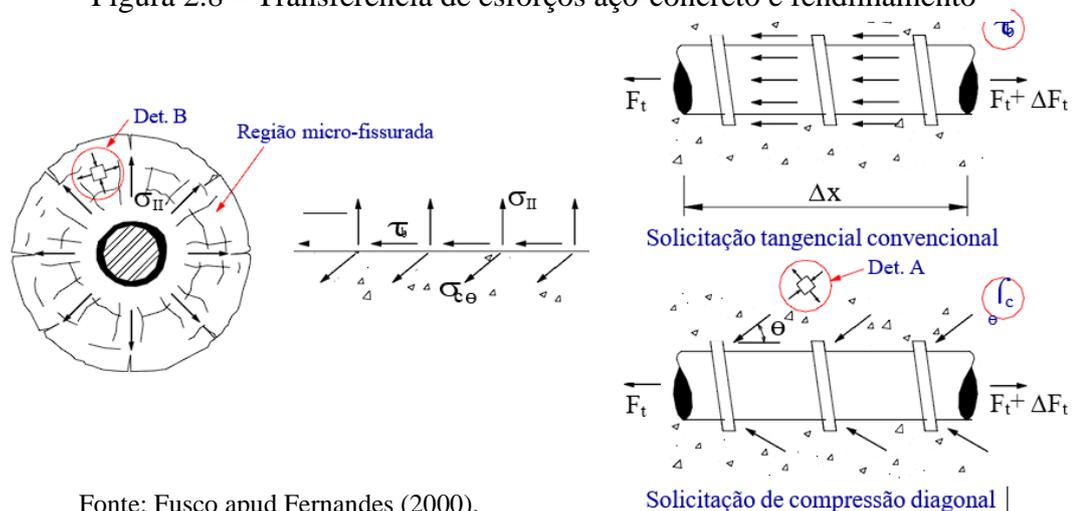
Portanto, as parcelas de aderência não podem ser obtidas separadamente (adesão, atrito e mecânica) dada a complexidade de variáveis e a própria natureza do problema. A apresentação delas nesse trabalho de forma separada foi apenas para compreender melhor os mecanismos por trás da ligação do concreto com o aço.

## 2.5 Modos de ruptura aço-concreto

Segundo Tavares (2012) os principais modos de ruptura da aderência aço-concreto são:

- Ruptura por deslizamento da barra de aço: ocorre quando os consoles de concreto entre as nervuras são rompidos, permitindo o deslizamento da barra de aço do interior do concreto sendo uma ruptura dúctil. Ocorre quando o cobrimento de concreto é suficiente para resistir às tensões radiais ou quando existe armadura transversal suficiente para impedir ou retardar a propagação da fissuração por fendilhamento;
- Ruptura por fendilhamento (figuras abaixo): consiste da ruptura do concreto adjacente à barra de aço proveniente do aumento das tensões que superam a capacidade resistente da peça, originando uma fissuração intensa na direção transversal e longitudinal. Este tipo de ruptura ocorre quando o confinamento não é suficiente para garantir o arrancamento da barra;

Figura 2.8 – Transferência de esforços aço-concreto e fendilhamento



Fonte: Fusco *apud* Fernandes (2000).

Outra situação que também pode ocorrer é a ruptura por escoamento do aço, quando a tensão na barra atinge a tensão de escoamento antes dos modos de ruptura anteriores, caso o comprimento de ancoragem seja suficiente. Devido ao efeito Poisson, a contração da barra de aço aumenta drasticamente no escoamento, ocorrendo a perda da tensão normal e, consequentemente, perda da capacidade de transferência de tensões. Neste caso, o escoamento ocorre antes que seja atingida a capacidade resistente da ligação, ou seja, a aderência entre os dois materiais excede o limite de escoamento do aço. Esta situação pode ser considerada como um caso particular de fendilhamento (BRISOTTO, 2011; TAVARES, 2012).

Segundo afirma Rosales (2016), nas barras nervuradas, criadas para desenvolver maior aderência, o fenômeno da aderência tem natureza fundamentalmente diferente das barras lisas. E ainda ao citar França (2004), afirma que a resistência aos deslizamentos neste tipo de barras se deve principalmente à resistência que o concreto oferece às pressões que sobre ele são exercidas pelas nervuras, ou seja, nas barras nervuradas a aderência depende principalmente da ação mecânica entre o concreto e as nervuras, assim como já foi comentado anteriormente.

A grande diferença, comparando com o caso das barras lisas, descrito acima, é que o travamento com as nervuras não pode ser perdido. Consequentemente, somente um fendilhamento generalizado pode pôr um fim a este estágio de aderência (ROSALES, 2016).

## **2.6 Aderência e ancoragem – ABNT NBR 6118:2014**

### **2.6.1 Tensão de Aderência**

Na concretagem de uma peça, tanto no lançamento como no adensamento, o envolvimento da barra pelo concreto é influenciado pela inclinação dessa barra. Sua inclinação interfere, portanto, nas condições de aderência, que por sua vez interfere no cálculo do comprimento de ancoragem (MUZARDO, 2003).

O posicionamento da barra durante a concretagem de acordo com a ABNT NBR 6118:2014 interferem na aderência da barra à pasta de cimento, considerando-se boa situação quanto à aderência os trechos das barras que estejam:

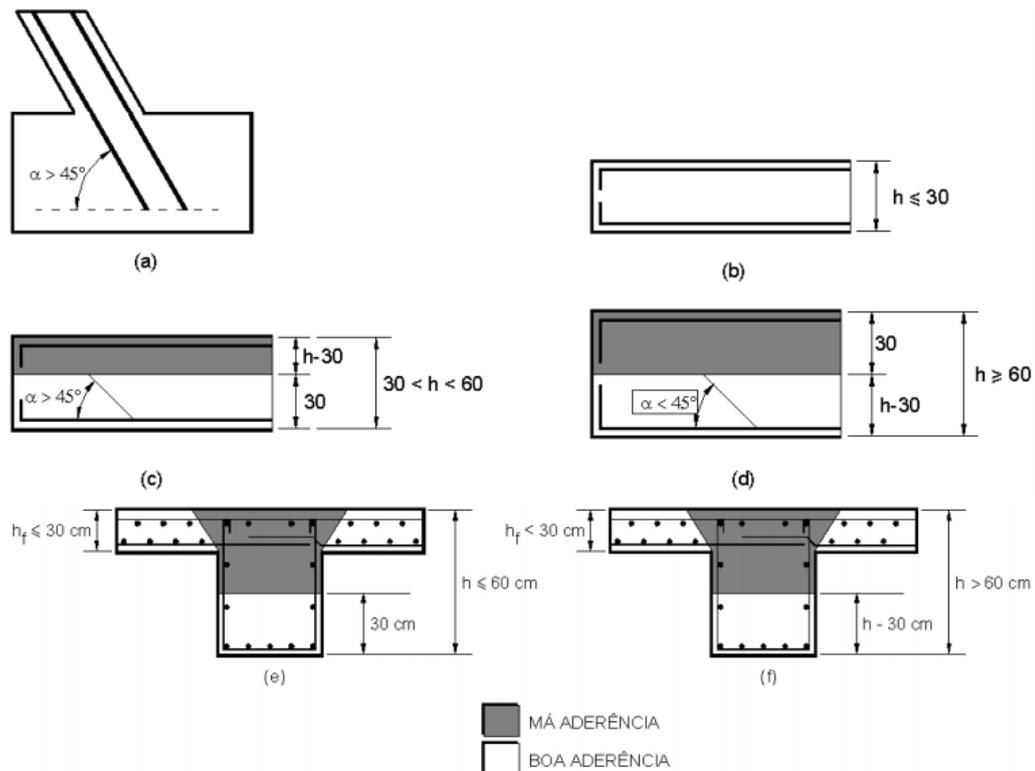
- a) com inclinação maior que  $45^\circ$  sobre a horizontal;
- b) horizontais ou com inclinação menor que  $45^\circ$  sobre a horizontal, desde que:
  - i. para elementos estruturais com  $h < 60$  cm, localizados no máximo 30 cm acima da face inferior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima;

ii. para elementos estruturais com  $h \geq 60$  cm, localizados no mínimo 30 cm abaixo da face superior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima.

c) Os trechos das barras em outras posições, e quando do uso de formas deslizantes, devem ser considerados em má situação quanto à aderência.

Na Figura 2.9 a seguir é possível ver mais claramente o que a norma fala ao se referir a posição da barra na peça de concreto armado.

Figura 2.9 – Condições de boa e de má aderência em vigas de concreto armado



Fonte: Muzardo (2003).

Analisando estas situações, pode-se afirmar que o peso do concreto favorece o adensamento, melhorando as condições de aderência. Outro fator é que camadas mais superiores de concreto estão mais passíveis a exsudação, produzindo mais poros e prejudicando a aderência.

No item 9.3.2.1 tem-se que a resistência de aderência de cálculo entre a armadura e o concreto na ancoragem de armaduras passivas deve ser obtida pela seguinte expressão:

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd} \quad (2.1)$$

Onde,

$$\eta_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{para barras lisas} \\ 1,4 & \text{para barras entalhadas} \\ 2,25 & \text{para barras nervuradas} \end{cases}$$

$$\eta_2 = \begin{cases} 1,0 & \text{para situações de boa aderência} \\ 0,7 & \text{para situações de má aderência} \end{cases}$$

$$\eta_3 = \begin{cases} 1,0 & \text{para } \phi \leq 32 \text{ mm} \\ (132 - \phi)/100, & \text{para } \phi \geq 32 \text{ mm} \end{cases}$$

Em que  $\phi$  é o diâmetro da barra expressa em mm.

A resistência à tração direta  $f_{ct}$  pode ser considerada igual a  $0,9 f_{ct,sp}$  ou  $0,7 f_{ct,f}$ , ou, na falta de ensaios para obtenção de  $f_{ct,sp}$  e  $f_{ct,f}$ , pode ser avaliado o seu valor médio ou característico por meio das seguintes equações:

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m} \quad \text{e} \quad f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ct,m} \quad (2.2 \text{ e } 2.3)$$

Para concretos de classes até C50:

$$f_{ct,m} = 0,3 (f_{ck})^{2/3} \quad (2.4)$$

Para concretos de classes C55 até C90:

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln (1 + 0,11 f_{ck}) \quad (2.5)$$

Onde  $f_{ct,m}$  e  $f_{ck}$  são expressos em Megapascal (MPa). Sendo  $f_{ckj} \geq 7$  MPa, estas expressões podem também ser usadas para idades diferentes de 28 dias.

## 2.6.2 Comprimento de ancoragem

Segundo recomendações da norma todas as barras das armaduras devem ser ancoradas de forma que as forças a que estejam submetidas sejam integralmente transmitidas ao concreto, seja por meio de aderência ou de dispositivos mecânicos ou por combinação de ambos.

A ancoragem por aderência acontece quando os esforços são ancorados por meio de um comprimento reto ou com grande raio de curvatura, seguido ou não de gancho.

Com exceção das regiões situadas sobre apoios diretos, as ancoragens por aderência devem ser confinadas por armaduras transversais passivas ou pelo próprio concreto, considerando-se este caso quando o cobrimento da barra ancorada for maior ou igual a  $3\phi$  e a distância entre barras ancoradas for maior ou igual a  $3\phi$ .

Nas regiões situadas sobre apoios diretos, a armadura de confinamento não é necessária devido ao aumento da aderência por atrito com a pressão do concreto sobre a barra.

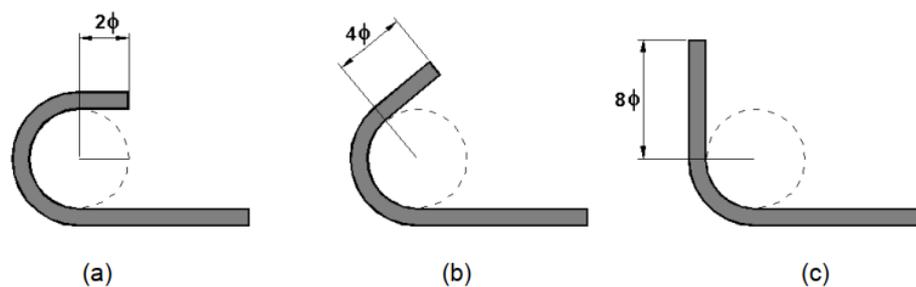
No subitem 9.4.2 da ABNT NBR 6118:2014 a ancoragem passiva de armaduras se dá por meio do prolongamento reto ou curvatura das barras, com a ressalva de que as barras comprimidas devem ser ancoradas sem ganchos. As condições para ancoragem estão a seguir:

- a) obrigatoriamente com gancho para barras lisas;
- b) sem gancho nas que tenham alternância de solicitação, de tração e compressão;
- c) com ou sem gancho nos demais casos, não sendo recomendado o gancho para barras de  $\phi > 32$  mm ou para feixes de barras.

Os ganchos das extremidades das barras da armadura longitudinal de tração podem ser, como mostra a Figura 2.10:

- a) semicirculares, com ponta reta de comprimento não inferior a  $2\phi$ , para as barras lisas, os ganchos devem ser semicirculares.
- b) em ângulo de  $45^\circ$  (interno), com ponta reta de comprimento não inferior a  $4\phi$ ;
- c) em ângulo reto, com ponta reta de comprimento não inferior a  $8\phi$ .

Figura 2.10 – Tipos de ganchos em barras



Fonte: Muzardo (2003).

Para a norma os diâmetros internos da curvatura dos ganchos das armaduras longitudinais de tração devem ter valores mínimos de acordo com a tabela a seguir.

Tabela 2.1 – Diâmetro de dobramentos das barras

Bitola (mm)	Tipo de aço		
	CA-25	CA-50	CA-60
< 20	4φ	5φ	6φ
≥ 20	5φ	8φ	-

Fonte: NBR 6118 (2014).

### 2.6.3 Comprimento de ancoragem

#### 2.1.1.1. Comprimento de ancoragem básico

Define-se comprimento de ancoragem básico como o comprimento reto de uma barra de armadura passiva necessário para ancorar (resistir) a força-limite  $R = A_s \cdot f_{yd}$  nessa barra admitindo-se, ao longo desse comprimento, resistência de aderência uniforme e igual a  $f_{bd}$ . O comprimento de ancoragem básico é dado por:

$$l_b = \frac{\phi}{4} \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \geq 25\phi \quad (2.6)$$

O comprimento de ancoragem básico  $l_b$  é obtido igualando-se a força última de aderência  $l_b \cdot \pi \cdot \phi \cdot f_{bd}$  com o esforço na barra  $R_s = A_s \cdot f_{yd}$ .

$$l_b \cdot \pi \cdot \phi \cdot f_{bd} = A_s \cdot f_{yd} \quad (2.7)$$

Onde,  $A_s = \frac{\pi \phi^2}{4}$ .

Assim,

$$l_b = \frac{\phi}{4} \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \quad (2.8)$$

De modo mais resumido, o comprimento de ancoragem é um valor acrescido a barra a partir do comprimento utilizado na peça (por exemplo, uma viga) para garantir a transferência das tensões do aço ao concreto.

#### 2.1.1.2. Comprimento de ancoragem necessário

Para os casos em que a área efetiva da armadura  $A_{s,ef}$  utilizada na peça a ser concretada é maior que a área calculada  $A_{s,calc}$ , a tensão nas barras diminui e, portanto, o comprimento de ancoragem necessário passa a ser dado considerando-se o comprimento básico e a relação entre as áreas, assim como se segue:

$$l_{b,nec} = \alpha \cdot l_b \cdot \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \geq l_{b,min} \quad (2.9)$$

Onde,

$$\alpha = \begin{cases} 1,0 & \text{para barras sem gancho} \\ 0,7 & \text{para barras tracionadas com gancho, com cobrimento do gancho} \geq 3\phi \\ 0,7 & \text{quando houver barras transversais soldadas} \\ 0,5 & \text{para barras transversais soldadas e gancho com cobrimento do gancho} \geq 3\phi \end{cases}$$

e

$$l_{b,min} \geq \begin{cases} 0,3 l_b \\ 10 \phi \\ 100 \text{ mm} \end{cases}$$

## 2.7 Alguns estudos da literatura

### 2.7.1 Análise numérica - experimental do comportamento da aderência aço-concreto – Rosales (2016)

Este estudo buscou os parâmetros do comportamento da aderência aço-concreto através da investigação experimental e a utilização dos resultados na aplicação em modelos numéricos. A investigação experimental foi dividida em três etapas (Etapa I, Etapa II e Etapa III).

No programa experimental foram definidos quatro parâmetros a serem estudados:

- Nível de confinamento do concreto.
- Cobrimento de concreto.
- Efeito da forma.
- Diâmetro da barra.

Os corpos de prova da “Etapa I” foram compostos por um cilindro de concreto de 150 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento; e por barras de aço de 10 e 12 mm de diâmetro.

O comprimento de ancoragem definido para todo os corpos de prova foi de 100 mm conforme recomenda RILEM RC5 (1973).

Corpos de prova para os ensaios da “Etapa II” também de geometria cilíndricos de concreto, com 100, 150 e 200 mm de diâmetro, e barras de aço de 8, 10 e 12 mm de diâmetro.

Na Etapa III, foram utilizados corpos de prova prismáticos de concreto de 200 mm de aresta e por barras de aço de 8, 10 e 12 mm de diâmetro.

Os corpos de prova pertencentes às Etapa I e III foram elaborados utilizando o Concreto A, e os modelos da Etapa II foram concretados utilizando o Concreto B. Para eles foram obtidos os valores constantes na Tabela 2.2. As dimensões e características geométricas dos corpos de prova estão na Figura 2.11.

Tabela 2.2 – Propriedades físicas dos concretos A e B

Concreto	Resistência a compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência a Tração (MPa)
Concreto A	34,01	25,11	3,16
Concreto B	31,61	23,97	3,00

Fonte: Rosales (2016).

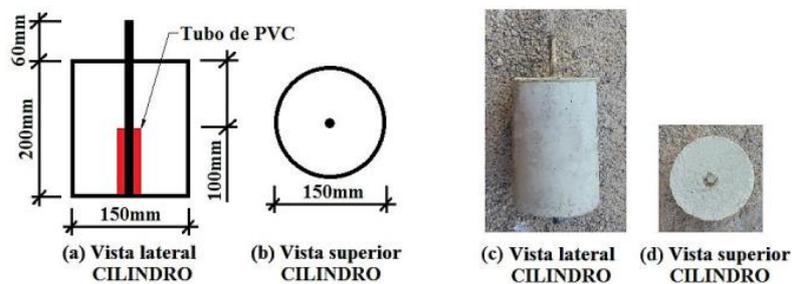
Os dados das barras de aço utilizadas no trabalho estão na Tabela 2.3.

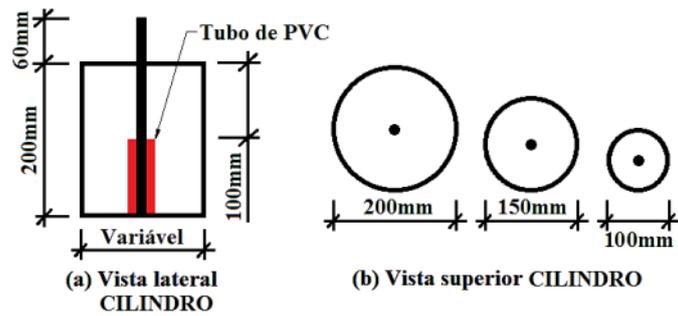
Tabela 2.3 – Propriedades físicas do aço

Diâmetro da Barra (mm)	Módulo de Elasticidade ( $E_s$ ) (GPa)	Tensão de Escoamento ( $f_y$ ) (MPa)
8	198,4	561,2
10	194,5	531,1
12	195,3	558,7

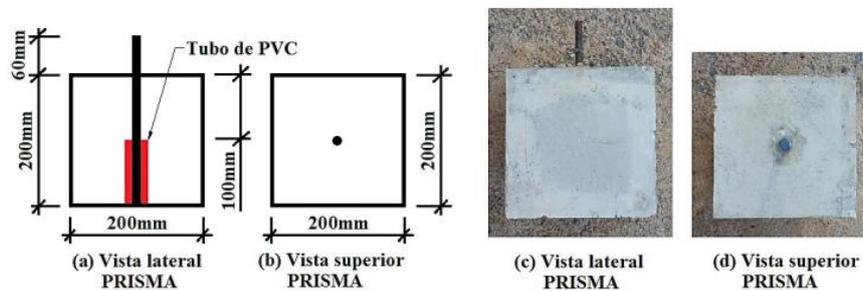
Fonte: Rosales (2016).

Figura 2.11 – Dimensões dos corpos de prova





(a) Corpos de prova da Etapa II



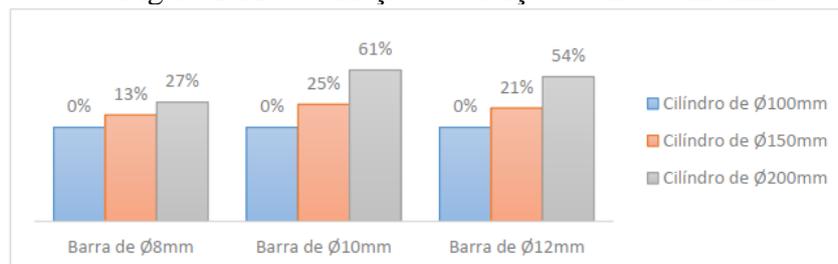
(b) Corpos de prova da Etapa III

Fonte: Rosales (2016).

Tanto nos corpos de prova com barras de  $\varnothing 10$  mm quanto nos corpos de prova com barras de  $\varnothing 12$  mm existe um ligeiro aumento das forças e tensões máximas quando foi colocada a camisa de confinamento. Levando-se em consideração os resultados se evidencia que o uso da chapa de confinamento não foi tão eficaz quanto se pensava, pois o incremento das tensões máximas não foi significativo.

De acordo com os resultados obtidos neste estudo, evidenciou-se um aumento da força e tensão máxima na medida que houve um aumento no diâmetro do corpo de prova. Na Figura 2.12 pode-se observar esse incremento da força e tensão máxima obtida nos testes quando aumenta o diâmetro dos corpos de prova, mantendo constante o diâmetro da barra. Isso pode ser melhor visto na Tabela 2.4.

Figura 2.12 – Variação das forças e tensões máximas



Fonte: Rosales (2016).

Observaram-se um aumento da tensão máxima de aderência conforme aumenta o cobrimento de concreto, isso aconteceu de forma semelhante para os diâmetros de 8 e 12 mm. Pode-se afirmar, portanto, que o aumento de cobrimento de concreto provoca um aumento significativo do confinamento passivo sobre a barra e conseqüentemente o aumento da resistência do contato entre os materiais.

Tabela 2.4 – Dados experimentais dos ensaios da etapa II

<i>Ø da barra (mm)</i>	<i>Nome do corpo de prova</i>	<i>Força máxima de Arrancamento (kN)</i>		<i>Tensão máxima de Aderência (MPa)</i>	
		<i>Valor</i>	<i>Média</i>	<i>Valor</i>	<i>Média</i>
<b>8</b>	100_8_1	23,99	<b>24,03</b>	9,55	<b>9,56</b>
	100_8_2	24,37		9,70	
	100_8_3	23,74		9,45	
	150_8_1	27,23	<b>27,21</b>	10,83	<b>10,83</b>
	150_8_2	26,73		10,64	
	150_8_3	27,67		11,01	
	200_8_1	30,32	<b>30,51</b>	12,06	<b>12,14</b>
	200_8_2	30,61		12,18	
200_8_3	30,60	12,18			
<b>10</b>	100_10_1	28,30	<b>28,50</b>	9,01	<b>9,07</b>
	100_10_2	30,77		9,79	
	100_10_3	26,42		8,41	
	150_10_1	35,79	<b>35,51</b>	11,39	<b>11,30</b>
	150_10_2	34,54		10,99	
	150_10_3	36,20		11,52	
	200_10_1	45,72	<b>45,88</b>	14,55	<b>14,61</b>
	200_10_2	44,99		14,32	
200_10_3	46,94	14,94			
<b>12</b>	100_12_1	34,34	<b>35,65</b>	8,61	<b>8,93</b>
	100_12_2	35,19		8,82	
	100_12_3	37,41		9,38	
	150_12_1	41,40	<b>42,97</b>	10,38	<b>10,77</b>
	150_12_2	44,47		11,15	
	150_12_3	43,03		10,78	
	200_12_1	54,79	<b>54,85</b>	13,73	<b>13,75</b>
	200_12_2	53,94		13,52	
200_12_3	55,83	13,99			

Fonte: Rosales (2016).

Observou-se, ainda, que nos corpos de prova de diâmetro 100 mm as tensões tendem a diminuir, porque à medida que se aumenta o diâmetro das barras o cobrimento se reduz, ocasionando a ocorrência de fendilhamento no concreto.

Para os corpos de prova prismáticos as tensões de aderência tendem a aumentar. Nestes ensaios observa-se um incremento das tensões quando aumenta o diâmetro da barra, igualmente registrado na Etapa I e nos corpos de prova de 200 mm de diâmetro da Etapa II.

Foi feita uma comparação entre os resultados obtidos nos corpos de prova da Etapa II, e os da Etapa III. Na Tabela 2.5 são mostradas as médias das solicitações máximas dos corpos de prova em função da geometria e das barras de aço utilizadas.

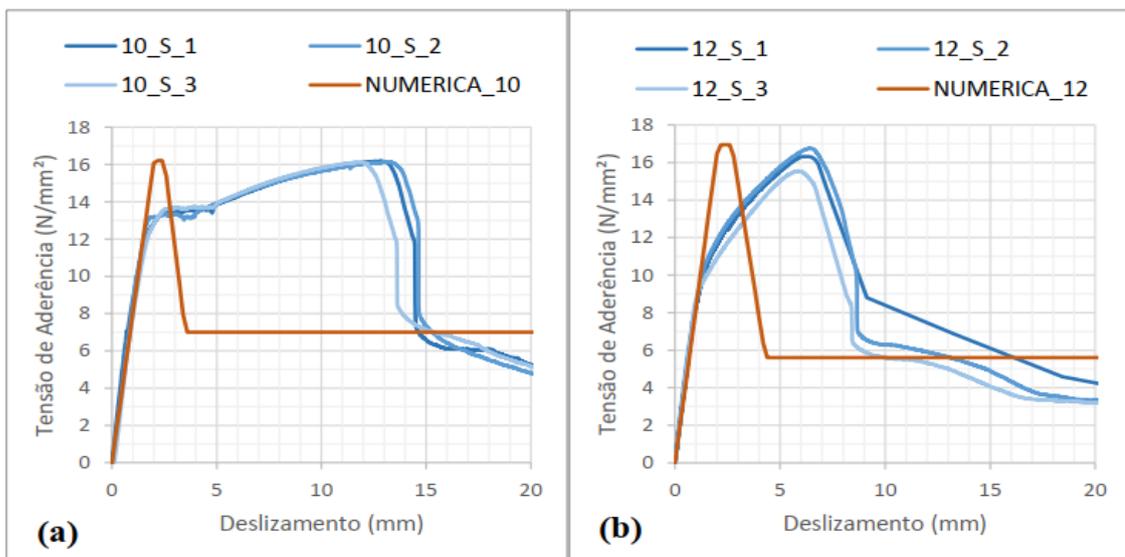
Tabela 2.5 – Resistências máximas dos CP no estudo do efeito de forma

<i>Ø da barra (mm)</i>	<i>Subgrupo</i>	<i>Média da força máxima de arrancamento (kN)</i>	<i>Média da tensão máxima de aderência (MPa)</i>
<b>8</b>	CPP_8	27,85	11,08
	200_8	30,51	12,14
<b>10</b>	CPP_10	41,96	13,36
	200_10	45,88	14,61
<b>12</b>	CPP_12	52,18	13,08
	200_12	54,85	13,75

Fonte: Rosales (2016).

Onde CPP significa Corpo de Prova Prismático e CP, Corpo de Prova. Já com os resultados, conclui-se que os corpos de prova com geometria cilíndrica registraram um aumento das solicitações em relação aos corpos de prova prismáticos.

Figura 2.13 – Curvas de tensão de aderência *versus* deslizamento. (a) CP com barras de  $\phi$  10 mm, (b) CP com barras de  $\phi$  12 mm.

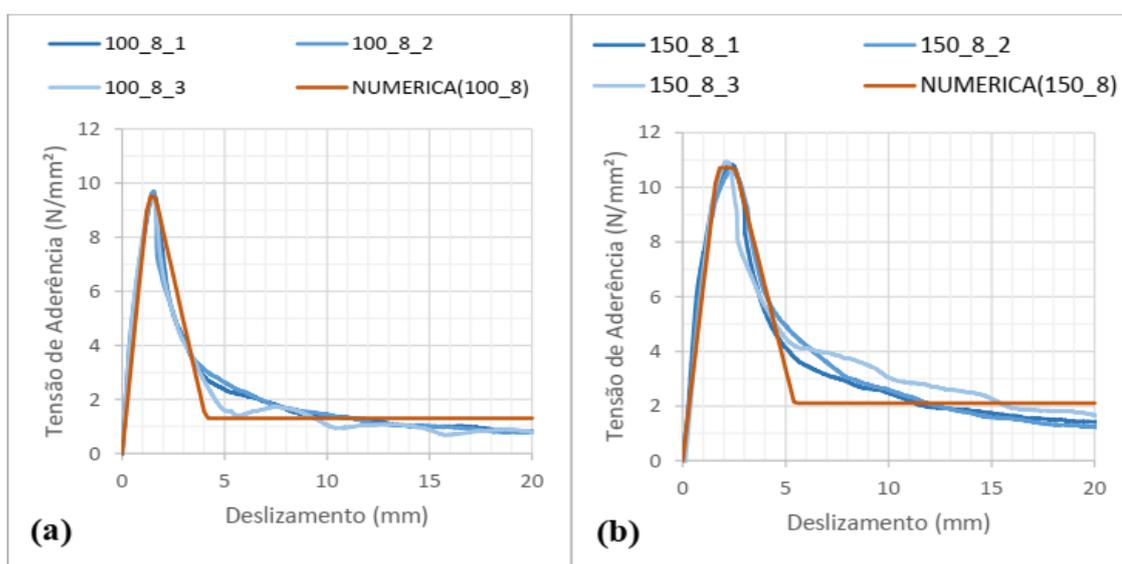


Fonte: Rosales (2016).

Na Figura 2.13 são mostradas as curvas de comportamento da aderência simuladas numericamente em conjunto com as curvas obtidas por meio da investigação experimental da Etapa I. Embora os modelos numéricos tenham sido precisos no primeiro trecho das curvas, pode-se afirmar que as simulações numéricas não conseguiram reproduzir com sucesso o comportamento real do ensaio de arrancamento da Etapa I.

Na Figuras 2.14 estão ilustradas as curvas de comportamento para corpos de prova com barras de 8 de diâmetro da Etapa II, as demais barras (10 e 12 mm) apresentaram comportamentos semelhantes nas curvas.

Figura 2.14 – Curvas de tensão de aderência *versus* deslizamento. (a) CP de  $\phi$  100 mm com barras de  $\phi$  8 mm (100\_8), (b) CP de 200 mm com barras de  $\phi$  8 mm (200\_8).

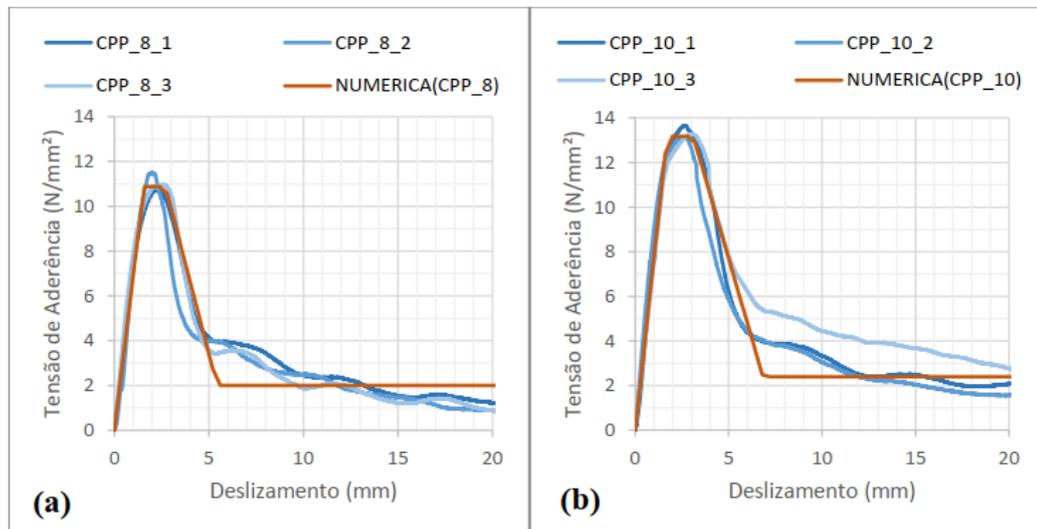


Fonte: Rosales (2016).

Agora, nas Figuras 2.15a e 2.15b são mostrados os gráficos de comportamento da tensão de aderência *versus* o deslizamento da barra para os modelos com barra de 8 e 10 mm de diâmetro da Etapa III. Nestes modelos, o comportamento das tensões foi similar ao comportamento obtido em laboratório.

O comportamento do concreto, do aço e da interface nas simulações de modelos prismáticos foi similar ao comportamento obtido nos modelos cilíndricos. Também, estes modelos conseguiram reproduzir com aceitável precisão o desempenho das tensões de aderência dos corpos de prova ensaiados em laboratório.

Figura 2.15 – Curvas de tensão de aderência *versus* deslizamento. (a) CP prismáticos de com barras de  $\phi$  8 mm (CPP\_8), (b) CP prismáticos com barras de  $\phi$  10 mm (CPP\_10).



Fonte: Rosales (2016).

### 2.7.2 Comparativo experimental entre os métodos de ensaios pull-out e push-out para determinação da tensão de aderência aço-concreto – Brisotto (2012)

O objetivo específico proposto para o presente trabalho foi comparar os resultados obtidos em ensaios de aderência tipo pull-out (procedimento RILEM) com os derivados de ensaios do tipo push-out, verificando se algum deles estabelece uma correlação melhor com os resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto.

Com foco nesse objetivo foram testados corpos de prova com barras de aço CA-50 e diâmetro de 8,0 mm, inseridas em concreto convencional composto de cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI), com densidade absoluta de 3,10 g/cm³.

Para a caracterização da aderência aço-concreto realizaram-se dois tipos de ensaios de aderência aço-concreto: o *pull-out* e o *push-out*.

A diferença básica é que no ensaio de *pull-out* a barra é arrancada do concreto que reage contra uma placa de aço e no ensaio de *push-out* a barra é empurrada contra o concreto que a envolve.

A Figuras 2.16 ilustram o esquema adotado para o ensaio *pull-out* com os detalhes das dimensões do corpo de prova.

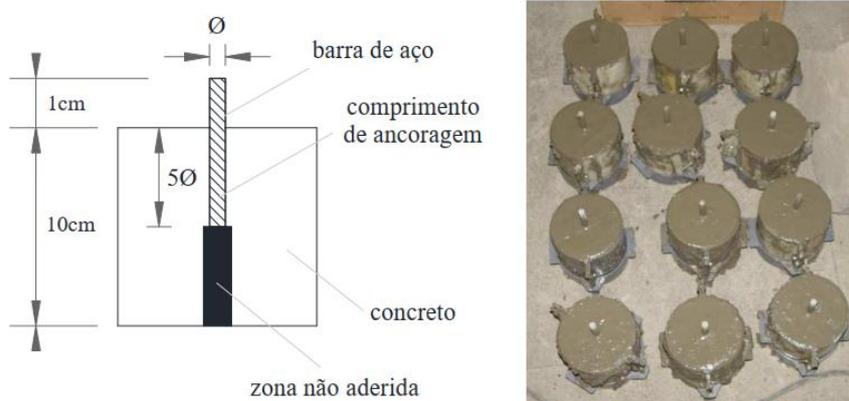
Figura 2.16 – Esquema detalhado e foto dos CPs *pull-out* recém moldados



Fonte: Brisotto (2012).

A Figuras 2.17 esboça o esquema adotado para o ensaio *push-out* com os detalhes das dimensões do corpo de prova.

Figura 2.17 – Esquema detalhado e foto dos CPs *push-out* recém moldados



Fonte: Brisotto (2012).

Por meio do valor de força obtidas nos ensaios dividido pela área de ancoragem da barra, calcula-se a tensão de aderência ( $\tau_b$ ), como mostra a Equação 1. Nesta equação  $F$  é a força de arrancamento,  $\varnothing$  é o diâmetro da barra de aço e  $l_{exp}$  é o comprimento de ancoragem do ensaio. Vale ressaltar que a tensão última (máxima) de aderência ( $\tau_{bu}$ ) foi calculada com base na força máxima de arrancamento obtida no ensaio.

$$\tau_b = \frac{F}{\pi \cdot \varnothing \cdot l_{exp}} \quad (2.10)$$

A Tabela 2.6 exibe os resultados dos ensaios de compressão do concreto obtidos mediante ensaios com 12 corpos de prova.

Tabela 2.6 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial do concreto

Corpo de Prova	Resistência à compressão axial	
	$f_{c7}$ (MPa) 07 dias	$f_{c28}$ (MPa) 28 dias
CP1	37,6	45,0
CP2	35,9	46,1
CP3	36,3	46,5
CP4	35,7	47,0
CP5	35,5	44,7
CP6	37,2	47,2
Média ± D.P.	36,4±0,9	46,1±1,0

Fonte: Brisotto (2012).

Na Tabela 2.7 está apresentado os resultados de tensão máxima de aderência para os dois ensaios realizados aos 07 e 28 dias.

Tabela 2.7 – Resultados dos ensaios de aderência (*pull-out* e *push-out*)

Corpo de Prova	<i>Pull-Out</i>		<i>Push-Out</i>	
	$\tau_{bu7}$ (MPa) 7 dias	$\tau_{bu28}$ (MPa) 28 dias	$\tau_{bu7}$ (MPa) 7 dias	$\tau_{bu28}$ (MPa) 28 dias
CP1	25,6	29,9	20,7	27,6
CP2	21,9	29,4	23,9	32,1
CP3	22,9	31,6	24,3	32,0
Média ± D.P.	23,5±1,9	30,3±1,1	23,0±2,0	30,6±2,5

Fonte: Brisotto (2012).

Mediante os resultados obtidos é possível concluir que os dois métodos para analisar a aderência aço-concreto (*pull-out* e *push-out*) proporcionam resultados similares de tensão última de aderência. Esta conclusão pode ser de grande ajuda visto que o método de ensaio *push-out* possui maior facilidade de implementação quando comparado ao *pull-out*.

Outro fator relevante está na fabricação dos moldes, pois a facilidade da moldagem e desmoldagem poderá proporcionar avanços para a pesquisas com o método APULOT, que visa a implementação do ensaio de aderência aço-concreto em canteiros de obras.

### 2.7.3 Estudo da Aderência entre Concreto e Aço pelo Ensaio Apulot Utilizando Concreto de Alta Resistência – Martins *et al* (2014)

Esta pesquisa realizou uma comparação entre valores de tensão de aderência, através do ensaio APULOT, de concretos de resistência normal e concretos de alta resistência.

Para que a caracterização do concreto fosse completa além da análise da tensão de aderência foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade.

Para esta pesquisa foram realizados três diferentes traços de concreto (20, 60 e 80MPa) que utilizaram dos seguintes materiais: agregado natural miúdo: areia lavada; agregado natural graúdo: brita 1 basáltica; cimento: CP II–E–32; Aço: CA-50 com diâmetro de 8 milímetros; Adições: sílica ativa; aditivos: plastificante (para 20 Mpa) e superplastificante (para 60 e 80MPa).

Para esta pesquisa foi utilizada a dosagem feita por Guimarães (1999) no caso do traço de 80MPa, para os demais foi empobrecido. Com base em resultados de corpos de prova testes os traços foram modificados conforme a Tabela 2.8 e os comprimentos de aderência conforme Tabela 2.9.

Tabela 2.8 – Traços Finais

Resistência (MPa)	Cimento : Areia: Brita	A/C	Aditivo
20	1 : 2,69 : 3,35	0,55	0,2%
60	1 : 2,01 : 2,88	0,35	1,0 %
80	1 : 1,45 : 2,08	0,34	1,5%

Fonte: Martins (2014).

Tabela 2.9 – Comprimento de ancoragem

Resistência	Resistência Real	Tensão de Escoamento do Aço	Comprimento de Ancoragem
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[cm]
20	23,70	580	9,50
60	62,10		4,70
80	75,56		3,96

Fonte: Martins (2014).

O método APULOT é uma modificação do ensaio *pull-out*, e utiliza como protótipos para corpo-de-prova garrafas de plástico PET cilíndricas, que devem possuir um diâmetro mínimo de 8 cm e se possível um formato mais homogêneo na zona aderente.

É importante deixar uma parte da barra livre para que entre em contato com o concreto e gere a tensão de aderência procurada. Para isso é necessário a aplicação da Equação 2.11.

$$\sigma_{ab} = \frac{F_{aplicada}}{Área} = \frac{F_{aplicada}}{2.\pi.R.l_{ancoragem}} \quad (2.11)$$

Sendo:  $\sigma_{ad}$  = tensão de aderência;  $F_{aplicada}$  = força aplicada na barra de aço obtida no ensaio APULOT; R = raio da seção transversal da barra de aço;  $l_{ancoragem}$  = comprimento de ancoragem. A Tabela 2.9 abaixo mostra os valores obtidos no ensaio APULOT.

Tabela 2.10 – Resultados do ensaio APULOT

<b>Resistência</b>	<b>Idade</b>	<b>PET</b>	<b>Resistência à Compressão</b>	<b>Carga de Ruptura</b>	<b>Tensão de Aderência</b>	<b>Tensão de Ad. Média</b>
<b>MPa</b>	<b>dias</b>		<b>MPa</b>	<b>kN</b>	<b>MPa</b>	<b>MPa</b>
20	7	1	23,15	21,17	8,87	9,38
		3		23,61	9,89	
	28	1	28,18	18,86	7,91	9,31
		4		20,74	8,69	
		6		27,04	11,33	
	60	7	1	45,4	35,18	29,79
2			33,82		28,64	
4			34,4		29,13	
28		1	52,81	29,09	24,65	24,93
		2		28,53	24,18	
		4		30,27	25,65	
80	7	1	50,61	29,94	30,09	29,96
		2		30,61	30,77	
		3		26,51	26,65	
		4		32,15	32,31	
	28	1	52,81	21,85	21,96	24,96
		2		26,3	26,43	
		4		26,38	26,51	

Fonte: Martins (2014).

Foi observado uma elevação contínua ao longo das idades (3, 7 e 28 dias) nos resultados de propriedades mecânicas do concreto. Mesmo assim, diferente dos resultados apresentados pelo traço de 20MPa, os concretos de 60 e 80 MPa chegaram a valores de resistência a compressão bem próximos ao esperado.

#### 2.7.4 Aplicação de redes neurais artificiais na predição da aderência aço-concreto em ensaios do tipo pull-out – Lorenzi *et al* (2017)

O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial das Redes Neurais Artificiais (RNAs) para interpretação de dados com vistas a apresentar a modelagem de uma RNA capaz de realizar uma aproximação não linear, visando estimar a resistência à compressão do concreto a partir dos resultados de ensaios de aderência aço-concreto, e demonstrar a precisão da estimativa das RNAs frente a modelos estatísticos de regressão múltiplas tradicionais.

De forma a atingir o objetivo proposto por este trabalho, utilizou-se uma RNA com 4 camadas, implementada com a utilização do programa computacional MATLAB 6.0, apropriada para interpretação dos dados de ensaios de aderência aço-concreto, com vias a produzir estimativas de resistência.

Os dados de origem utilizados no presente estudo para treinar e testar as RNAs englobavam resultados de ensaios de aderência aço-concreto tipo pull-out de três diferentes pesquisas. A Tabela 2.10 mostra quais foram os dados retirados e os respectivos autores.

Tabela 2.11 – Dados experimentais

References	$\emptyset$ (mm)	le (mm)	c (mm)	Age (days)	Concrete compressive strength $f_c$ (MPa)
Castro (2000) [16]	16	80	52 / 92	15 / 18	83,04 / 86,14
Fernandes (2000) [17]	10 / 20	50 / 100	45 / 90	28	27,47 / 27,99
Barbosa (2002) [18]	16 / 20	80 / 100	52 / 90	90	33,63/54,77/63,31/
França (2004) [19]	16	80	92	28 / 90	32,97 / 35,21
Almeida Filho (2006) [20]	10 / 16	50 / 80	45 / 72	7 / 14	30 / 60
Graeff (2007) [21]	8/12,5	40/62,5	36/56,2	21	25
Caetano (2008) [15]	12,5	62,5	61,8	63	25 / 45 / 65
Simplicio (2008)[22]	6,3/8/10/ 12,5/16	18,9/24/30/ 37,5/48	96,9/96/95/ 93,8/92	90	40/35,9/41,4/34/37,4/39,4 /40/39,6/28/29,1/29,3
Reis (2009)[23]	10/16	50/80	45/72	28	23,6/ 37,2
Silva (2010) [3]; Silva et al. (2013) [24]	8/10 /12,5	40/50/62,5	96/95/93,7	3/7/28	16,7/21,1/28/33,1/40,5/49,9
Lorrain et al. (2010) [25]	12,5	62,5	56,2	28	20

Continua

Tabela 2.11 – Dados experimentais

References	$\varnothing$ (mm)	le (mm)	c (mm)	Age (days)	Concrete compressive strength $f_c$ (MPa)
Castro (2000) [16]	16	80	52 / 92	15 / 18	83,04 / 86,14
Fernandes (2000) [17]	10 / 20	50 / 100	45 / 90	28	27,47 / 27,99
Barbosa (2002) [18]	16 / 20	80 / 100	52 / 90	90	33,63/54,77/63,31/
França (2004) [19]	16	80	92	28 / 90	32,97 / 35,21
Almeida Filho (2006) [20]	10 / 16	50 / 80	45 / 72	7 / 14	30 / 60
Graeff (2007) [21]	8/12,5	40/62,5	36/56,2	21	25
Caetano (2008) [15]	12,5	62,5	61,8	63	25 / 45 / 65
Simplício (2008)[22]	6,3/8/10/ 12,5/16	18,9/24/30/ 37,5/48	96,9/96/95/ 93,8/92	90	40/35,9/41,4/34/37,4/39,4 /40/39,6/28/29,1/29,3
Reis (2009)[23]	10/16	50/80	45/72	28	23,6/ 37,2
Silva (2010) [3]; Silva et al. (2013) [24]	8/10 /12,5	40/50/62,5	96/95/93,7	3/7/28	16,7/21,1/28/33,1/40,5/49,9
Lorrain et al. (2010) [25]	12,5	62,5	56,2	28	20
Lorrain et al. (2011) [4]	8	80/135	36	3/7/14	6,8/8,1/15,07/23,54/26,75/ 27,12
Ferreira et al. (2011)[26]	6,3/8/10	31,5/40/50	46	7	38,2/45,3
Tojal (2011)[27]	10/16	50/ 80	45/ 72	28	34,5
Silva Filho et al. (2012) [28]	12,5	62,5	56,2	28	27,4
França (2012)[29]	6,3/8/10	31,5/40/50	96,9/96/95	21	25/40
Baiocchi et al. (2013) [30] Jacintho et al. (2013)[31]	10	63	46	7/28	49,56/59,63
Godoy et al. (2012)[32] Jacintho et al. (2014)[33]	8	110	46	14/ 28	23,54/38,27/43,27
Lovera e Frutos (2013)[34] Gavilan et al. (2014)[35]	8	91/80/70/63	46	3/5/7/28	20/25/30/35
Silva (2010) [3]; Silva et al. (2014)[36]	8/10/12,5	80/100/125/ 48/60/45	46/45/43,75	3/7/28	16,7/21,1/28/33,1/40,5/49,9
Martins et al. (2014)[37]	8	95/47/39,6	45	7	23,15/45,40/50,61

Fonte: Lorenzi (2017).

Os resultados encontrados na pesquisa mostram que é possível realizar um mapeamento não linear da relação resistência do concreto x aderência aço/concreto, levando em consideração parâmetros como o comprimento de ancoragem, o diâmetro da barra, a idade e ruptura e o cobrimento de concreto ao redor da barra de aço (confinamento). Dada a sinergia de efeitos e falta de conhecimento sobre cada um dos parâmetros que afetam a estimativa da força de compressão no concreto, pode-se concluir que o problema exige uma modelagem não-linear como as que RNAs podem ofertar.

## 2.8 Modelagem numérica

O avanço da tecnologia possibilitou a criação de métodos computacionais que se utilizam de modelos numéricos capazes de aproximar com precisão o que acontece a vida real no computador, de forma mais simples, econômica e rápida de análise de estruturas.

Segundo Felix (2018),

O método dos elementos finitos se apresenta como uma robusta ferramenta numérica para a análise estrutural. A mesma possibilita a discretização de um contínuo (domínio) em uma quantidade finita de elementos (subdomínios). Os elementos responsáveis pela discretização de um domínio (corpo) na modelagem via MEF possuem um determinado número de pontos, sendo denominados de nós. Os nós são caracterizados pela sua localização e possuem parâmetros nodais (os seus graus de liberdade), que, por sua vez, são valores que descrevem a grandeza desejada (força, deslocamento, velocidade, aceleração, entre outras).

Assim, dada uma concepção estrutural inabitual composta de elementos estruturais pré-fabricados, irregulares e descontínuos, a simulação numérica é um método que permite a análise do comportamento global com a obtenção de resultados de acordo com as condições de contorno analisadas na inspeção (PAULO, 2021). Este método pode ser empregado quando os objetos a serem estudados são muito complexos ou exigem um esforço muito grande com a utilização de métodos mais analíticos.

O conceito principal desse método consiste na divisão de um objeto contínuo em um número finito de elementos conectados por nós, formando, assim, uma malha de elementos. Com os deslocamentos dos nós são obtidos os valores de tensões e deformações para cada elemento, além as reações nos apoios. Escolheu-se esse método o presente trabalho por ser uma forma eficiente de realizar análises do comportamento de estruturas de concreto armado. Permitindo, mesmo com simplificações adotadas, a consideração do comportamento não-linear dos materiais concreto e aço, incluindo os processos de fissuração do concreto e de plastificação do concreto e do aço (SORIANO; LIMA, 2003 *apud* BARBOSA, 2017).

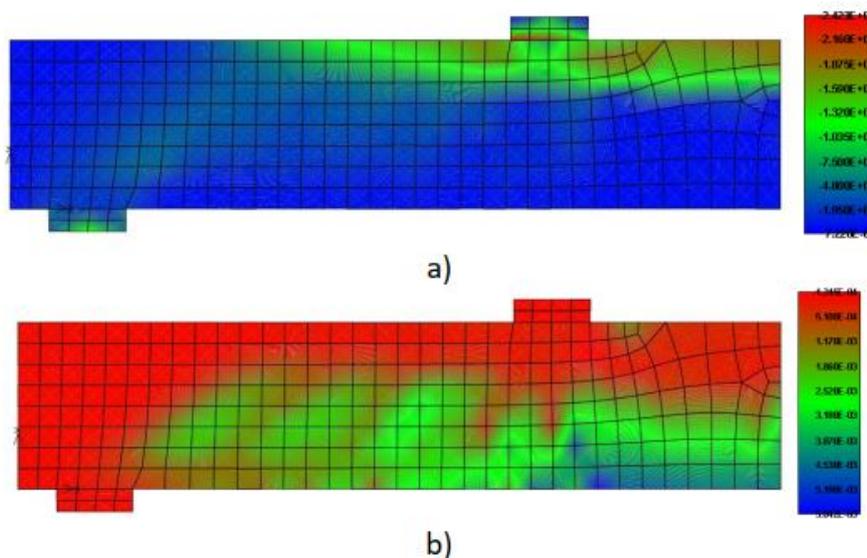
Com os avanços da tecnologia no campo da construção civil vem resultando em estruturas de concreto armado de diferentes soluções e cada vez mais esbeltas, requerendo análises mais refinadas dos que os métodos analíticos previstos em normas técnicas (PEREIRA, 2021).

A pesquisa de Pereira *et al* (2021)

[...] objetivou analisar a precisão de resultados obtidos por meio de aplicação do Método dos Elementos Finitos na simulação numérica de vigas de concreto armado, observou-se uma boa concordância com os valores experimentais e maior precisão quando comparado com os dimensionamentos das normas técnicas. Verificou-se também que a precisão da simulação depende diretamente da definição dos modelos e ajustes adotados na modelagem.

Na Figura 2.18 é possível ver a distribuição de tensões principais de compressão e deformações principais de tração do concreto em uma viga de concreto armado. Onde se percebe a concentração de tensões de tração na parte superior junto a aplicação das cargas e na parte inferior.

Figura 2.18 – Distribuições de tensões e deformações: a) compressão b) tração.



Fonte: Pereira (2021).

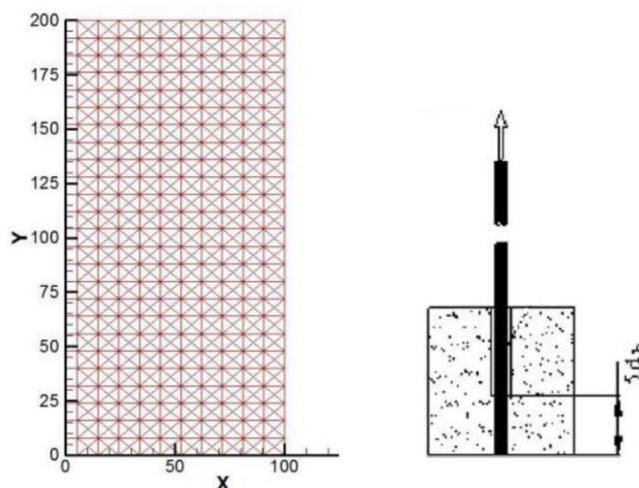
A larga utilização das barras de aço na construção civil deve-se primordialmente ao material apresentar homogeneidade e padronização industrial. Apesar disso, sob condições ambientais adversas podem apresentar corrosão. Trabalhos como o do Argenta (2016) mostra que o uso da barra de fibra polimérica (FRP) tem sido considerado como uma alternativa ao uso de barras de aço como reforço em estruturas de concreto. Em ambos os casos, a aderência entre a armadura e o concreto é um aspecto de fundamental importância no comportamento da estrutura de concreto armado (ARGENTA, 2016).

O objetivo do trabalho do Argenta (2016) consiste em analisar numericamente o comportamento aderente entre o concreto e barras de fibras poliméricas de carbono com diferentes tratamentos superficiais, através do método dos elementos finitos. Segundo ele a influência do acabamento superficial, do diâmetro das barras e da resistência à compressão do concreto foram avaliadas, e os resultados numéricos mostram uma boa concordância com os valores experimentais.

Modelo numérico é composto com barras de armadura inseridas dentro de um cubo de concreto de 200mm x 200 mm. O comprimento incorporado da armadura era de 5 vezes o

diâmetro da barra. A Figura 2.19 mostra a geometria e malha de elementos finitos empregada na análise. A face superior do concreto tem os deslocamentos em  $y$  restringidos. A barra de aço é deslocada para cima, na direção  $y$ , conforme indicado na figura.

Figura 2.19 – Malha de elementos finitos e geometria empregada na análise



Fonte: Argenta (2016).

Como resultados da análise, o modelo numérico concordou com os dados experimentais de forma satisfatória. Contudo apresentou algumas divergências, que pode ser explicado pela necessidade de refino dos parâmetros de influência do diâmetro quanto as incertezas decorrentes do próprio teste de arrancamento (ARGENTA, 2016).

### 3 ANÁLISE DO COMPRIMENTO DE ANCORAGEM CONFORME ABNT NBR 6118:2014

A importância do comprimento de ancoragem está relacionada ao fato de que as barras devem ser “amarradas” de forma que seus esforços sejam integralmente transmitidos para o concreto, seja por meio de aderência, seja por meio de dispositivos mecânicos, seja pela combinação de ambos (MUZARDO, 2003). É sobre esse comprimento que trata este capítulo. No qual a ancoragem estudada levará apenas em consideração armaduras passivas em seu comprimento reto, ou seja, sem a utilização de ganchos.

Os comprimentos de ancoragem foram calculados segundo a NBR 6118:2014. Onde se fez, posteriormente, uma relação da influência dos diferentes diâmetros das barras, das resistências a compressão do concreto, incluindo os concretos A e B da pesquisa de Rosales (2016), bem como a relação entre a área de aço efetivamente utilizada e a área de aço calculada

na obtenção do comprimento de ancoragem necessário a transmissão de esforços do aço ao concreto.

Foram calculadas também nesse capítulo as forças de arrancamento segundo formulações derivadas da NBR 6118:2014 para os corpos de prova do trabalho de Rosales (2016), e compararam-se os resultados obtidos experimentalmente por ele com dados obtidos analiticamente pela norma.

### 3.1 Tensão de aderência

O comprimento de ancoragem de armaduras passivas segundo a ABNT NBR 6118:2014 depende dos valores de tensões de aderência ( $f_{bd}$ ), que por sua vez está sujeito ao tipo de barra (lisa, entalhada ou nervurada) expresso pelo fator  $\eta_1$ , às situações de boa ou má aderência (critérios no item 9.3.1 da NBR 6118:2014) expresso pelo fator  $\eta_2$ , às variações do diâmetro das barras expresso pelo fator  $\eta_3$  e pela tensão de tração do concreto calculada ( $f_{ctd}$ ).

Devido as características dos ensaios do trabalho do Rosales (2016), por tratar apenas dos valores puros das tensões encontradas em laboratório, para este estudo o coeficiente de segurança  $\gamma_c$  foi considerado como sendo igual a 1 (um) nos cálculos subsequentes para encontrar o comprimento de ancoragem. Ou seja, as tensões de tração de concreto de projeto ( $f_{ctd}$ ) passam a ter valores iguais as tensões de tração característica inferior do concreto ( $f_{ctk,inf}$ ).

Buscou-se, principalmente, nos cálculos das tensões de aderência (item 9.3.2.1 da NBR 6116:2014) as situações mais desfavoráveis, onde sejam necessários comprimentos de ancoragem maiores para se obter o equilíbrio de forças na interface entre os materiais aço e concreto. Para tal, os valores utilizados dos coeficientes necessários para o cálculo da tensão de aderência foram  $\eta_1 = 2,25$  (barras nervuradas),  $\eta_2 = 0,7$  (má aderência) e  $\eta_3 = 1$  (barras com  $\phi \leq 32$  mm). A Tabela 3.1 apresenta todos os valores desses coeficientes segundo NBR 6118:2014.

Tabela 3.1 – Coeficientes para o cálculo da tensão de aderência

Característica	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$
lisa	1,0	-	-
entalhada	1,4	-	-
nervurada	2,25	-	-
boa aderência	-	1,0	-
má aderência	-	0,7	-
$\phi \leq 32$ mm	-	-	1,0
$\phi > 32$ mm	-	-	$(132-\phi)/100$

Fonte: NBR 6118 (2014).

Para obtenção dos dados de resistência de aderência foram utilizados os valores de resistência à compressão do concreto de 20 a 50 MPa, como mostrado na Tabela 3.2. O valor de 34,01 MPa referente ao concreto A e o valor de 31,61 MPa do concreto B (Tabela 2.2), ambos obtidos nos ensaios do trabalho do Rosales (2016). Na Tabela 3.2 se encontra a tensão de aderência ( $f_{bd}$ ) para os diferentes valores de resistência de compressão de concreto, calculada segundo a equação (2.1).

Tabela 3.2 – Tensões de Aderência do Concreto

<b>Tensão de aderência do concreto - <math>f_{bd}</math></b>									
	<b>Resistência de compressão do concreto (MPa)</b>								
	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>31,61 (A)</b>	<b>34,01 (B)</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>50</b>
<b><math>f_{ct,m}</math> (MPa)</b>	2,21	2,56	2,90	3,00	3,15	3,21	3,51	3,80	4,07
<b><math>f_{ctk,inf}</math> (MPa)</b>	1,55	1,80	2,03	2,10	2,20	2,25	2,46	2,66	2,85
<b><math>f_{ctd}</math> (MPa)</b>	1,55	1,80	2,03	2,10	2,20	2,25	2,46	2,66	2,85
<b><math>f_{bd}</math> (MPa)</b>	<b>2,44</b>	<b>2,83</b>	<b>3,19</b>	<b>3,31</b>	<b>3,47</b>	<b>3,54</b>	<b>3,87</b>	<b>4,18</b>	<b>4,49</b>

Fonte: Autor.

### 3.2 Comprimento de ancoragem básico

Com os valores de tensão de aderência calculados é possível obter os comprimentos ancoragem básicos. Entretanto, antes de partir para o cálculo, tem-se a ressalva de que a ancoragem pode se dá por meio de um comprimento reto ou com grande raio de curvatura, seguido ou não de gancho. Com exceção das regiões situadas sobre apoios diretos, as ancoragens por aderência devem ser confinadas por armaduras transversais (ver item 9.4.2.6) ou pelo próprio concreto, considerando-se este caso quando o cobrimento da barra ancorada for maior ou igual a  $3\phi$  e a distância entre barras ancoradas for maior ou igual a  $3\phi$  (NBR 6118, 2014).

O comprimento de ancoragem básico ( $l_b$ ) está condicionado aos valores da tensão de aderência ( $f_{bd}$ ), à tensão de escoamento do aço para armadura passiva ( $f_{yd}$ ) e ao diâmetro das barras ( $\phi$ ). Conforme o ensaio realizado no trabalho do Rosales (2016) o coeficiente de segurança utilizado para a tensão de escoamento do aço foi igual a 1 (um). De forma que as tensões de escoamento do aço calculadas ( $f_{yd}$ ) passam a ter valores iguais as tensões de escoamento característica do aço ( $f_y$ ).

A Tabela 3.3 mostra os valores do comprimento de ancoragem básico para vários valores de resistências do concreto a compressão e diâmetros das barras, calculados segunda a equação (2.8).

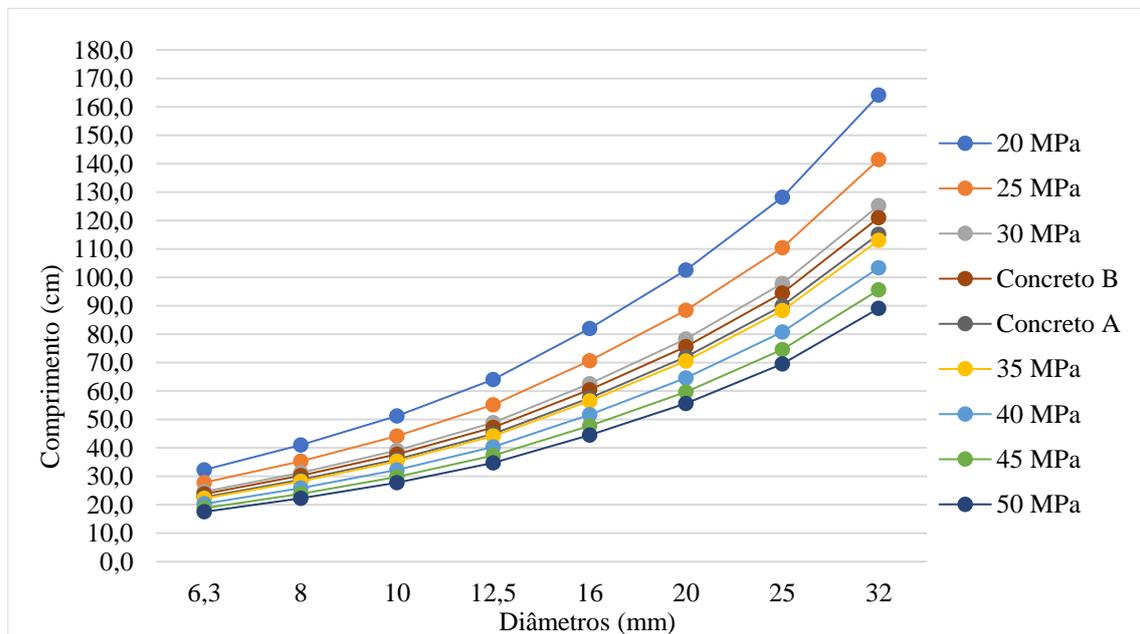
Tabela 3.3 – Comprimentos de ancoragem básicos

$l_b$ (cm)	Resistência do Concreto a Compressão	Diâmetros das barras (mm) - $\phi$							
		6,3	8	10	12,5	16	20	25	32
	20 MPa	32,3	41,0	51,3	64,1	82,1	102,6	128,2	164,1
	25 MPa	27,8	35,4	44,2	55,3	70,7	88,4	110,5	141,4
	30 MPa	24,7	31,3	39,1	48,9	62,6	78,3	97,9	125,3
	31,61 Mpa (B)	23,8	30,2	37,8	47,3	60,5	75,6	94,5	121,0
	34,01 MPa (A)	22,7	28,8	36,0	45,0	57,6	72,0	90,0	115,2
	35 MPa	22,3	28,3	35,3	44,2	56,5	70,6	88,3	113,0
	40 MPa	20,4	25,8	32,3	40,4	51,7	64,6	80,8	103,4
	45 MPa	18,8	23,9	29,9	37,3	47,8	59,7	74,7	95,6
	50 MPa	17,5	22,3	27,8	34,8	44,6	55,7	69,6	89,1

Fonte: Autor.

A partir dos dados obtidos da Tabela 3.3 foi possível construir o gráfico da Figura 3.1 que mostra como se relacionam a variação dos parâmetros de resistência à compressão do concreto e o diâmetro das barras para o cálculo do comprimento básico de ancoragem de armaduras passivas.

Figura 3.1 – Comprimento de ancoragem básico



Fonte: Autor.

Nota-se que o aumento do diâmetro das barras de aço provoca o aumento do comprimento de ancoragem básico para cada valor de resistência à compressão do concreto. Comportamento coerente com o equacionamento (2.8), uma vez que para maiores valores de resistência à compressão do concreto a consequência é o aumento das tensões de aderência.

Nota-se ainda que as barras sujeitas a maiores resistências de compressão do concreto apresentam diminuição do comprimento de ancoragem, como se pode ver, por exemplo, para a barra de 12,5 mm, em que no concreto de 20 MPa o comprimento está próximo a 65 cm, enquanto para concreto de 50 MPa o comprimento passa a ser cerca de 35 cm.

### 3.3 Comprimento de ancoragem necessário

O comprimento de ancoragem necessário para o bom desempenho do concreto armado segundo a norma brasileira é resultado direto da existência ou não de ganchos na extremidade barra (expresso por  $\alpha$ , item 9.4.2.5, NBR 6118:2014), do comprimento de ancoragem básico ( $l_b$ , item 9.4.2.4, NBR 6118:2014) e da relação entre área de aço calculada e área de aço efetivamente utilizada (dado por  $A_{s,calc}/A_{s,ef}$ ) para a armadura longitudinal. Além disso, os valores dos comprimentos de ancoragem necessários estão limitados por um comprimento de ancoragem mínimo ( $l_{b,min}$ ), que é o maior valor entre  $0,3l_b$ ,  $10\phi$  e 100 mm, onde  $\phi$  é o diâmetro da barra.

Os comprimentos mínimos de ancoragem estão na Tabela 3.4, valores obtidos em função dos diâmetros das barras e das resistências a compressão do concreto. Já os valores dos comprimentos básicos estão na Tabela 3.3.

Tabela 3.4 – Comprimentos mínimos de ancoragem

	Resistência do Concreto a Compressão	Diâmetros (mm)							
		6,3	8	10	12,5	16	20	25	32
$l_{b,min}$ (cm)	20 MPa	10,0	12,3	15,4	19,2	24,6	30,8	38,5	49,2
	25 MPa	10,0	10,6	13,3	16,6	21,2	26,5	33,2	42,4
	30 MPa	10,0	10,0	11,7	14,7	18,8	23,5	29,4	37,6
	31,61 MPa (B)	10,0	10,0	11,3	14,2	18,1	22,7	28,4	36,3
	34,01 MPa (A)	10,0	10,0	10,8	13,5	17,3	21,6	27,0	34,6
	35 MPa	10,0	10,0	10,6	13,2	17,0	21,2	26,5	33,9
	40 MPa	10,0	10,0	10,0	12,5	16,0	20,0	25,0	32,0
	45 MPa	10,0	10,0	10,0	12,5	16,0	20,0	25,0	32,0
	50 MPa	10,0	10,0	10,0	12,5	16,0	20,0	25,0	32,0

Fonte: Autor.

Consideraram-se para os cálculos barras sem ganchos de ancoragem, traduzido pelo parâmetro  $\alpha = 1,0$  e a relação  $A_{s,calc}/A_{s,ef}$  de 0,7, 0,8, 0,9 e 1,0, a escolha desses valores se deve ao que é mais comumente utilizado na vida real. Sendo que a 0,7 corresponde a aproximadamente 143% da área de aço calculada, 0,8 a 125%, 0,9 a 111% e 1,0 a 100%.

Os comprimentos de ancoragem necessários, calculados segundo a equação (2.9), estão na Tabela 3.5 para relação das áreas igual a 1 (um) e os gráficos com os valores das relações de áreas descritos no parágrafo anterior podem ser visualizados na Figura 3.2.

Tabela 3.5 – Comprimentos de ancoragem necessários para  $\alpha = 1,0$

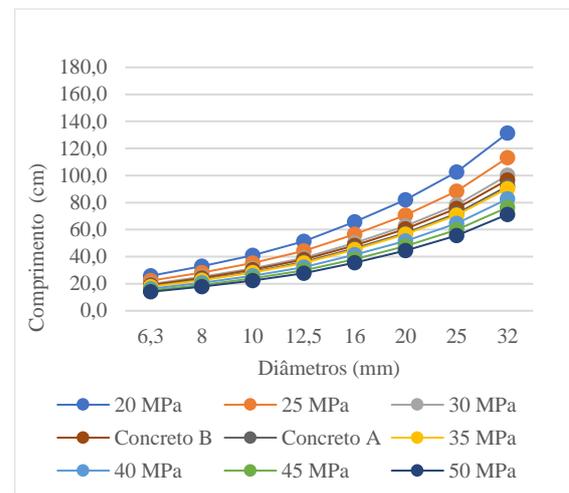
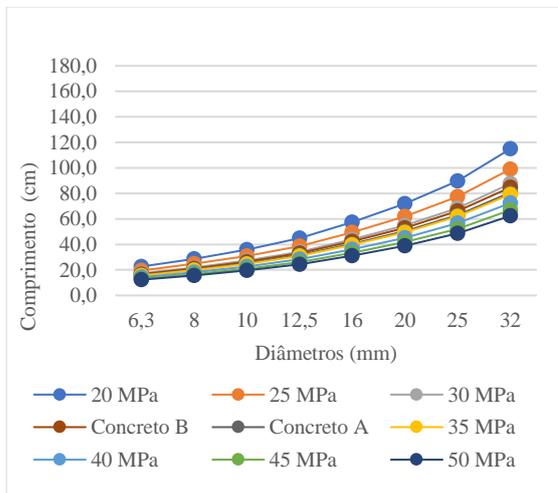
$l_{b,nec}$ (cm)	Resistência do Concreto a Compressão	Diâmetros (mm)							
		6,3	8	10	12,5	16	20	25	32
	20 MPa	32,3	41,0	51,3	64,1	82,1	102,6	128,2	164,1
	25 MPa	27,8	35,4	44,2	55,3	70,7	88,4	110,5	141,4
	30 MPa	24,7	31,3	39,1	48,9	62,6	78,3	97,9	125,3
	31,61 MPa (B)	23,8	30,2	37,8	47,3	60,5	75,6	94,5	121,0
	34,01 MPa (A)	22,7	28,8	36,0	45,0	57,6	72,0	90,0	115,2
	35 MPa	22,3	28,3	35,3	44,2	56,5	70,6	88,3	113,0
	40 MPa	20,4	25,8	32,3	40,4	51,7	64,6	80,8	103,4
	45 MPa	18,8	23,9	29,9	37,3	47,8	59,7	74,7	95,6
	50 MPa	17,5	22,3	27,8	34,8	44,6	55,7	69,6	89,1

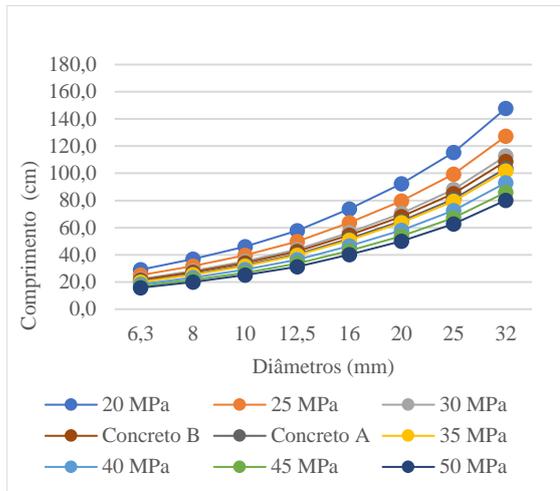
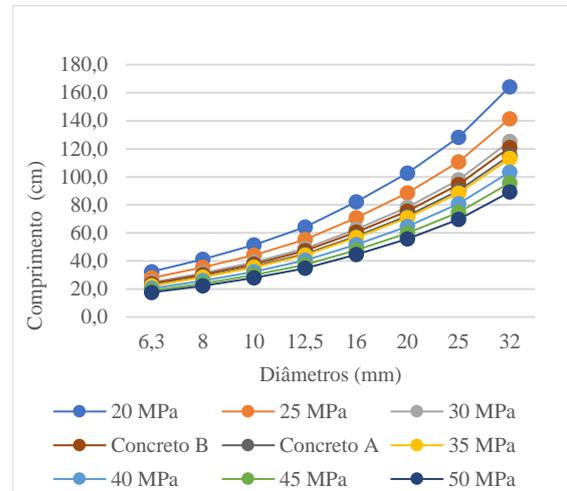
Fonte: Autor.

Figura 3.2 – Comprimento de ancoragem necessário

(a) Relação  $A_{s,calc}/A_{s,ef} = 0,7$

(b) Relação  $A_{s,calc}/A_{s,ef} = 0,8$



(c) Relação  $A_{s,calc}/A_{s,ef} = 0,9$ (d) Relação  $A_{s,calc}/A_{s,ef} = 1,0$ 

Fonte: Autor.

Percebe-se que o aumento do diâmetro das barras, para uma mesma resistência a compressão do concreto, provoca o aumento do comprimento de ancoragem necessário, enquanto que numa mesma barra nota-se que o aumento da resistência a compressão resulta na diminuição do comprimento de ancoragem, estando inversamente relacionadas de acordo com as formulações da NBR 6118:2014.

O aumento da área de aço efetivamente utilizada provoca a diminuição do tamanho da ancoragem nas barras de aço. A área de aço está diretamente relacionada ao diâmetro das barras, as quais influenciam diretamente nas tensões de aderência. Então aumentar a área de aço efetiva significa aumentar o diâmetro das barras de aço e assim aumentar as tensões de aderência que por sua vez acaba por reduzir o comprimento ancoragem necessário.

### 3.4 Forças de aderência

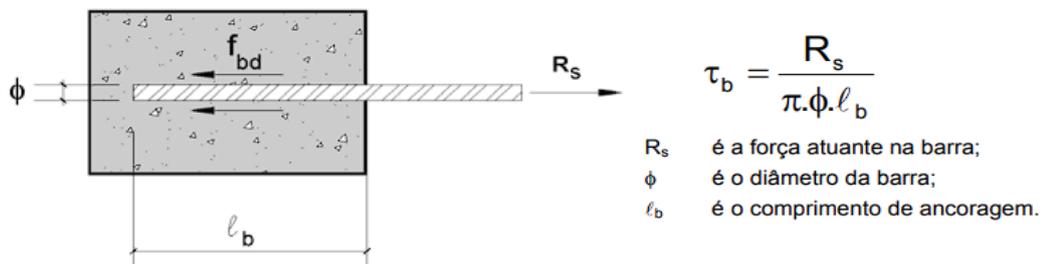
Antes de iniciar as discussões sobre as forças necessárias para rompimento da aderência de ligação aço-concreto das barras nervuradas em situação de confinamento passivo, há um fator percebido sobre a NBR 6118:2014 que deve ser discutida com relação as camadas de cobrimento de concreto sobre as barras de aço.

Nos resultados dos ensaios obtidos por Rosales (2016) pode-se perceber o impacto que o confinamento passivo tem no aumento das forças para o arrancamento das barras. O aumento do confinamento passivo está relacionado ao acréscimo da camada de concreto que envolvem as barras de aço. A norma traz isso de forma mais simples por meio de um cobrimento mínimo de  $3\phi$ . Porém não há nenhuma relação direta explicitamente citada por ela de que o aumento da camada de concreto acarreta o aumento das tensões de aderência.

A força calculada segundo essas considerações está sujeita apenas ao comprimento de ancoragem básico ( $l_b$ ), ao diâmetro da barra ( $\phi$ ) e a tensão de aderência ( $f_{bd}$ ). Então independente do cobrimento para cada barra os valores serão constantes.

O cálculo das forças de arrancamento é resultado do equilíbrio entre a força necessária para arrancar a barra do elemento de concreto e a força que surge para se opor a esta ação. Na figura 3.3 é possível visualizar a contraposição de esforços mencionados e a relação que demonstra o equilíbrio entre ambas as partes.

Figura 3.3 – Representação do equilíbrio de esforços no concreto armado



Fonte: Muzardo (2003).

$$F_{ac} = f_{bd,c} \cdot \pi \cdot \phi \cdot l_b \quad 3.1$$

Sobre os dados obtidos, as tensões de aderência, tanto a calculada quanto as dos resultados dos ensaios do trabalho de Rosales (2016), os valores de resistência à compressão utilizados foram do concreto B.

Já os valores de comprimento de ancoragem foram tomados iguais a 100 mm para as duas situações. A Tabela 3.6 mostra todos os valores obtidos para as forças máximas de arrancamento ( $F_{ae}$ ) para os dados dos ensaios e ( $F_{ac}$ ) para as forças de arrancamento calculadas pela expressão 3.1 da NBR 6118:2014, a qual também foi utilizada para obter os valores de aderência de laboratório.

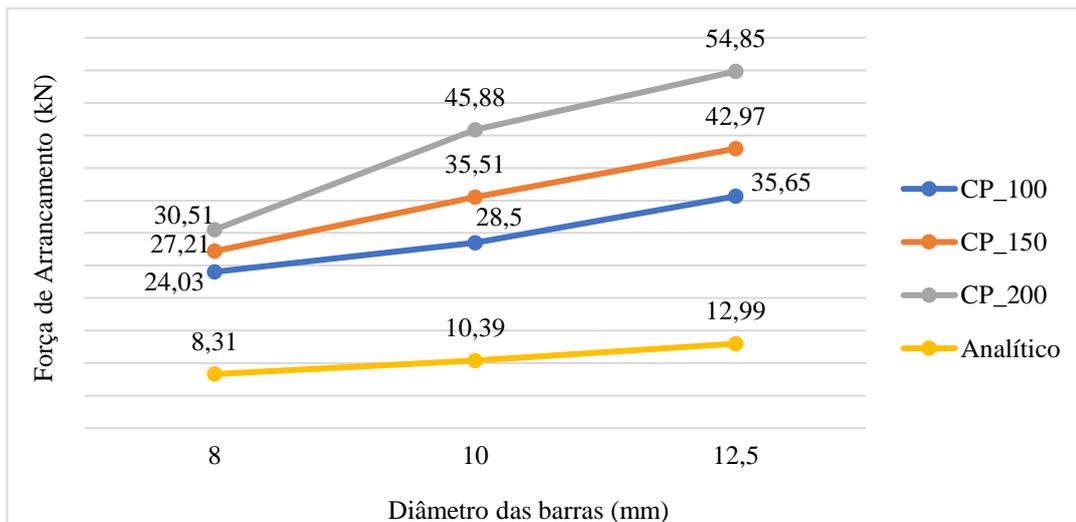
Tabela 3.6 – Forças de arrancamento

$\phi$ (mm)	CP	lb (m)	Dados Ensaaiados – Rosales (2016)		Dados Analíticos		Diferença Percentual
			F <sub>ae</sub> (kN)	f <sub>bd</sub> (MPa)	F <sub>ac</sub> (kN)	f <sub>bd,c</sub> (MPa)	
8	100_8	0,10	24,03	9,56	8,31	3,31	65,4%
	150_8	0,10	27,21	10,83	8,31	3,31	69,5%
	200_8	0,10	30,51	12,14	8,31	3,31	72,8%
10	100_10	0,10	28,50	9,07	10,39	3,31	63,6%
	150_10	0,10	35,51	11,3	10,39	3,31	70,7%
	200_10	0,10	45,88	14,61	10,39	3,31	77,4%
12,5	100_12	0,10	35,65	8,93	12,99	3,31	63,6%
	150_10	0,10	42,97	10,77	12,99	3,31	69,8%
	200_10	0,10	54,85	13,75	12,99	3,31	76,3%

Fonte: Autor.

Com os valores dispostos acima pode-se perceber que o acréscimo da espessura da camada de concreto sobre a barra tem um efeito de aumento de tensões, devido ao confinamento, em consequência disso há o aumento da força de arrancamento, como visto na Figura 3.4. Onde a curva denominada CP 100 correspondem aos valores de força de arrancamento dos corpos de prova de concreto com diâmetro de 100 mm, a curva CP 150 aos corpos de prova de concreto com 150 mm de diâmetro e a curva CP 200 aos corpos de prova de concreto com 200 mm de diâmetro, cada uma delas considerando as barras de 8, 10 e 12,5 mm de diâmetro.

Figura 3.4 – Gráfico das forças de arrancamento encontradas em laboratório



Fonte: Autor.

Por outro lado, nos dados analíticos a força apesar de se mostrar crescente ao passo que os diâmetros das barras e do corpo de prova também crescem, o diâmetro do corpo de prova em nada interfere nos valores de tensão de aderência, uma vez que este só depende das características físicas do concreto (resistência à compressão) e das características geométricas das barras (nervuras e diâmetros) segundo a NBR 6118:2014.

### **3.5 Considerações finais**

De forma geral, para os cálculos dos comprimentos de ancoragem (básico e necessário) nota-se que o aumento das tensões de compressão do concreto provoca a diminuição do comprimento de ancoragem para uma mesma barra, enquanto que o aumento de diâmetro da barra de aço resulta no aumento desse comprimento. Portanto para maiores valores de resistência à compressão do concreto a consequência é o aumento das tensões de aderência utilizada para o cálculo do comprimento de ancoragem referido.

Foram considerados para obtenção de comprimento de ancoragem as relações de área efetiva e calculada, sem ganchos, de 0,7, 0,8, 0,9 e 1,0. A escolha desses valores está relacionada a busca pela proximidade com o que se contra em situações reais. Onde 0,7 corresponde a aproximadamente 143% da área de aço calculada, e 1,0 a 100%. A influência dessa relação está no fato de que o aumento da área de aço efetivamente utilizada provoca o efeito de diminuição do tamanho da ancoragem nas barras de aço. A área de aço está diretamente relacionada ao diâmetro das barras, portanto, aumentar a área de aço efetiva significa aumentar esses diâmetros e assim aumentar as tensões de aderência que por sua vez acaba por reduzir o comprimento ancoragem necessário.

Nos resultados dos ensaios de Rosales (2016) observa-se o impacto que o confinamento passivo tem no aumento das forças para o arrancamento das barras ao aumentar o diâmetro dos corpos de prova. A NBR 6118:2014 traz isso de forma mais simples por meio de um cobrimento mínimo de  $3\phi$ . Porém não há nenhuma relação direta explicitamente citada por ela de que o aumento da camada de concreto acarreta o aumento das tensões de aderência.

Contudo, de forma geral, o acréscimo da espessura da camada de concreto sobre a barra tem um efeito de aumento de tensões, devido ao confinamento, em consequência disso há o aumento da força de arrancamento. Por outro lado, nos dados analíticos calculados a força apesar de se mostrar crescente ao passo que os diâmetros das barras e do corpo de prova também crescem, o diâmetro do corpo de prova em nada interfere nos valores de tensão de aderência,

uma vez que este só depende das características físicas do concreto (resistência a compressão) e das características geométricas das barras (nervuras e diâmetros) segundo a NBR 6118:2014.

De forma resumida, entender mais sobre as interações entre aço e concreto é extremamente importante não só para se conhecer o comportamento desses materiais frente as solicitações, como também conhecer as tensões as quais estão submetidos a longo do comprimento de ancoragem.

## **4 DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM**

Neste capítulo são apresentados aspectos da constituição dos modelos numéricos utilizados na modelagem. Também são apresentados o *software* utilizado e as considerações gerais sobre a modelagem numérica. Por fim, são mostradas as simulações e os respectivos resultados obtidos de acordo com os objetivos traçados.

O programa computacional ABAQUS empregado neste estudo utiliza o MEF de imensa aplicabilidade para problemas de análise estrutural, além de ser amplamente utilizado nas mais diversas áreas da engenharia (ARAÚJO, 2019). O ABAQUS utiliza o método dos elementos finitos do deslocamento, baseado na aproximação das condições de equilíbrio de um corpo sob o ponto de vista Lagrangiano, ou seja, cada ponto material do corpo é analisado, sendo uma função do tempo e de suas coordenadas, e as equações de equilíbrio são obtidas a partir do princípio dos trabalhos virtuais (CASTRO e SILVA, 2006).

O *software* contém duas partes, uma gráfica e outra responsável pelas soluções do sistema de equações de cada nó. O arquivo de entrada contém a geometria, as propriedades do material, as condições de contorno, o carregamento aplicado e a malha de elementos finitos definidos pelo usuário, também é possível nessa uma visualização gráfica do modelo (ARAÚJO, 2019). Para este trabalho foi utilizado o módulo Standard do ABAQUS CAE, na versão 6.14.

### **4.1 Aspectos gerais da modelagem**

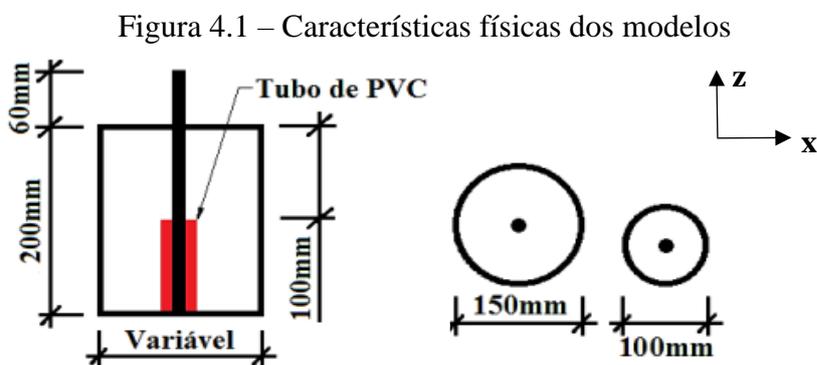
Inicialmente foram definidas as geometrias e as características físicas dos materiais que constituem o modelo do corpo de prova. Segundo, foram atribuídos a cada respectivo elemento constitutivo do modelo, o corpo de concreto, a barra de aço e interface dos elementos os valores característicos de cada material (resistência a compressão, tensão de escoamento e coeficiente de Poisson) necessários para execução da simulação. Em seguida, foram definidas as

condições de contorno (restrição dos deslocamentos) e as condições naturais de contorno (cargamento e ações sobre os elementos). Por último, foi executada a simulação para obter os resultados de deslocamento, tensão e deformação do modelo numérico.

Os modelos foram constituídos tendo como referência os corpos de prova do trabalho de Rosales (2016). Todos eles são formados pela união de dois elementos constitutivos.

Um dos modelos constitutivos são os das barras ( $\phi 8$ ,  $\phi 10$  e  $\phi 12,5$  mm) com característica do aço conforme Tabela 4.3 e comprimento total de 260 mm, onde 200 mm estão inseridos no centro dos corpos de prova de concreto e 60 mm sobressalentes utilizados para realização do ensaio de arrancamento, Figura 4.1. Dos 200 mm inseridos, tendo o topo do CP como referência (o lado dos 60 mm sobressalentes), Figura 4.1, apenas os primeiros 100 mm tem contato direto com o concreto, enquanto os outros 100 mm restantes foram isolados por meio de um furo “livre” de 20 mm de diâmetro, impedindo contato entre os materiais.

O outro elemento numérico é a constituição dos corpos de prova em concreto com 100 e 150 mm de diâmetro, onde possuem características físicas dos materiais constante na Tabela 4.2. Foram realizados dois furos de 100 mm ao longo do seu comprimento, um deles referente ao diâmetro exato da barra utilizada em conjunto para a simulação até a metade do CP e o outro com diâmetro constante de 20 mm da metade ao restante do comprimento do corpo de prova. A Figura 4.1 mostra em detalhes essas características.



Fonte: Rosales (2016).

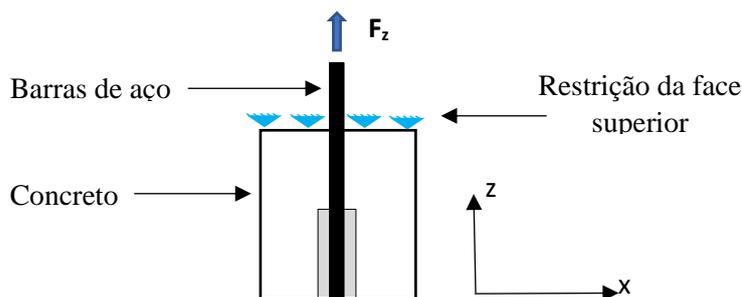
A realização dos ensaios em laboratório de acordo com as pesquisas de Rosales (2016) teve o objetivo de verificar as forças máximas médias de arrancamento nas barras, por consequência encontrar as tensões máximas médias de aderência, relacionando, principalmente, esses resultados com a variação do diâmetro das barras e das camadas de concreto que as envolvem.

Da mesma forma, as simulações aqui propostas buscam o comportamento da distribuição de tensões ao longo do comprimento de ancoragem tanto nas barras de aço quanto no

concreto. Comparando os resultados obtidos na modelagem com os efeitos provocados pelos diferentes diâmetros das barras e das camadas de concreto sobre elas.

Na barra foi aplicada uma força de arrancamento máxima ( $F_z$ ), na direção z, obtida nos ensaios do trabalho do Rosales (2016). Na Figura 4.2 também está representada a restrição da face superior do modelo apenas no elemento de concreto, impedindo seu deslocamento no eixo z.

Figura 4.2 – Condição de contorno essencial dos modelos numéricos



Fonte: Autor.

Foi utilizado para cada modelo numérico um arquivo diferente no *software* ABAQUS/CAE com as características individuais de cada corpo de prova segundo a Etapa II do estudo do Rosales (2016).

## 4.2 MALHAS DOS ELEMENTOS

Foram construídos seis modelos, sendo três modelos com geometria cilíndrica de 100 mm de diâmetro e três modelos com geometria cilíndrica de 150 mm de diâmetro. As malhas geradas na simulação foram em função das geometrias dos modelos.

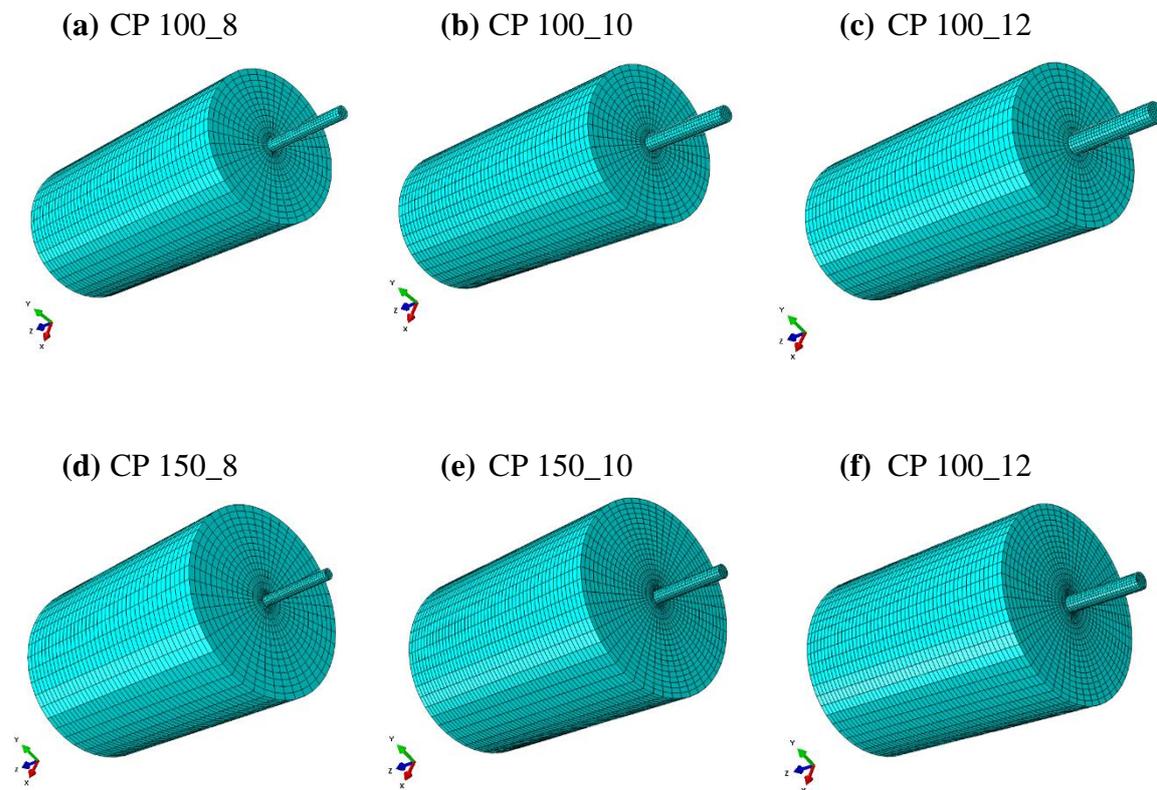
Na Tabela 4.1 mostram-se as quantidades de elementos geradas nos modelos numéricos e na Figura 4.3 apresentam-se as malhas correspondentes.

Tabela 4.1– Quantidade de elementos finitos por modelo numérico

Modelos dos Corpos de Prova	Elementos sólidos do CP de concreto	Elementos sólidos da barra
CP 100_8	21000	2730
CP 100_10	21525	4160
CP 100_12	20500	5720
CP 150_8	43400	2730
CP 150_10	41250	4160
CP 150_12	43200	5720

Fonte: Autor.

Figura 4.3 – Modelos numéricos das simulações



Fonte: Autor.

### 4.3 Modelos constitutivos

A reprodução numérica dos materiais ensaiados em laboratório e da interface é imprescindível para a realização de uma simulação numérica. Tendo isso em vista, para o modelo do corpo de prova de concreto foi considerado um comportamento elástico linear, enquanto para a barra de aço foi construído um modelo de comportamento perfeitamente elástico-plástico e na interface considerou-se uma restrição do tipo *tie*, ou seja, um tipo vinculação disponível no *software* ABAQUS, onde os nós da união entre as superfícies apresentem os mesmos deslocamentos.

#### 4.3.1 Concreto

Para o comportamento do corpo de prova de concreto foi considerado modelo elástico linear, apesar de conhecida as suas limitações com relação as deformações plásticas e a imprevisibilidade da ruptura. Essa escolha é devida a procura por respostas do comportamento da interação entre as superfícies dos materiais, ou seja, no comportamento da interface entre aço e concreto.

Esse modelo é o mais simplificado, pois se tem uma relação linear crescente entre as tensões e as suas respectivas deformações, segundo a lei de Hooke. O modelo linear elástico dependerá de dois parâmetros, o Módulo de Elasticidade do concreto ( $E_c$ ) e o coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ).

O Módulo de Young foi obtido a través dos ensaios em laboratório e o coeficiente de *Poisson* foi um parâmetro considerado como sendo igual a 0,2, ambos retirados de Rosales (2016). A Tabela 4.2 traz o resumo os valores do concreto utilizado nas simulações numéricas.

Tabela 4.2 – Características mecânicas do concreto B

Concreto	$E_c$ (GPa)	$\nu$
Concreto B	23,97	0,2

Fonte: Rosales (2016).

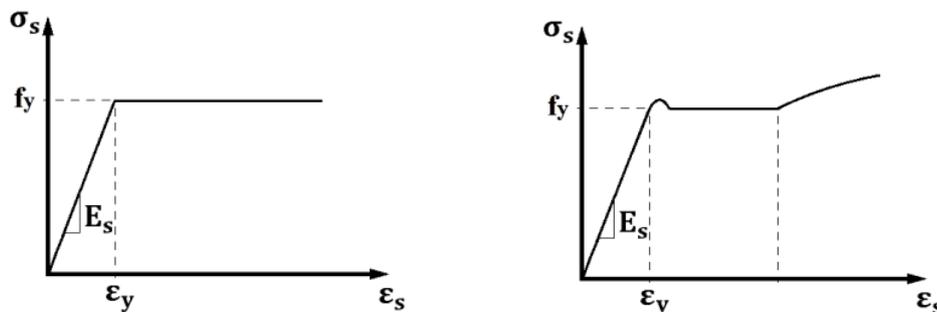
### 4.3.2 Aço

Para este modelo constitutivo foi adotado, por simplificação, o comportamento perfeitamente elástico-plástico, como apresentado na Figura 4.4, onde  $f_{yk}$  é a resistência característica de escoamento do aço e  $f_{yd}$  a resistência de projeto.

Figura 4.4 – Diagramas tensão-deformação para aço em armaduras passivas

(a) Comportamento ideal

(b) Comportamento real



Fonte: Rosales (2016).

A Figura 4.4 (b) mostra as fases comportamentais do aço, onde se tem como primeira fase a elástica, cuja relação entre tensão e deformação se dá de forma linear, na segunda fase há o início do escoamento a partir do valor de tensão  $f_y$ , nesse intervalo pode-se perceber um ligeiro pico, seguido do aumento das deformações sem acréscimo nos valores tensões e por último a fase de encruamento do aço, onde há um aumento de resistência até a ruptura do material.

Os valores dos ensaios do aço obtidos de Rosales (2016) estão na Tabela 4.3 para cada diâmetro das barras utilizadas nas simulações numéricas.

Tabela 4.3 – características mecânicas das barras de aço

Diâmetro (mm)	Es (GPa)	$f_s$ (MPa)
8	195,3	561
10	195,4	530
12	190,1	558

Fonte: Rosales (2016).

### 4.3.3 Interface

Na interface do modelo numérico construído no ABAQUS adotou-se a restrição do tipo *tie*, onde a sua principal característica garante que os nós da união entre os materiais resultem nos mesmos deslocamentos. Essa interação entre as superfícies é tida como uma ligação rígida, onde não há deslizamento relativo entre as duas superfícies.

Para a utilização desse tipo de vinculação determinam-se duas superfícies, uma chamada de *master* (ou mestre), foram definidas as superfícies das barras de aço como tal, e outra chamada de *slave* (ou escrava), nesta foi tomada a superfície de concreto. A escolha deste tipo de restrição adotada foi com o objetivo de simplificar as simulações, sem deixar, contudo, de almejar resultados mais próximos da realidade.

### 4.3.4 Construção de modelos no ABAQUS

As simulações foram compostas de seis modelos numéricos, dos quais, três de geometria cilíndrica de 100 mm de diâmetro e três de geometria cilíndrica de 150 mm de diâmetro. Em cada geometria foram utilizadas barras de 8, 10 e 12 mm.

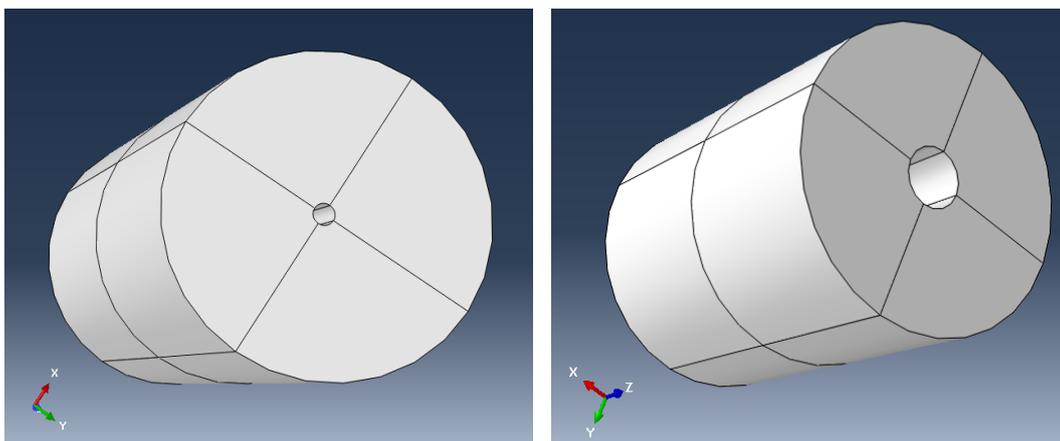
Para a modelagem, as características dos materiais adotadas nesse processo foi a do concreto com  $E_c = 23,97$  GPa e  $\nu = 0,2$  e a do aço, para as barras de 8 mm de diâmetro com  $E_s = 198,4$  GPa e  $f_y = 561,2$  MPa; para as barras de 10 mm de diâmetro  $E_s = 194,5$  GPa e  $f_y = 531,1$  MPa e para as barras de 12 mm de diâmetro,  $E_s = 195,3$  GPa e  $f_y = 558,7$  MPa

Foram ilustradas nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 a modelagem do CP de 150 mm com a barra de 10 mm como um exemplo, cabendo ressaltar que todas as modelagens dos outros foram feitas de forma análoga.

Foram criados dois volumes para cada modelo numérico, um correspondente as barras e outro correspondente aos CPs com as respectivas características físicas e geométricas. Inicialmente tem-se a etapa de construção no *module part* (parte modular) e *property* (proprie-

dades) do ABAQUS/CAE, onde são construídas as geometrias e inseridas as propriedades físicas dos materiais. Considerou-se o concreto como sendo um material elástico linear e o aço como sendo um material perfeitamente elástico-plástico. Abaixo na Figura 4.5 está o modelo do CP de 150 mm e furo da barra de 10 mm.

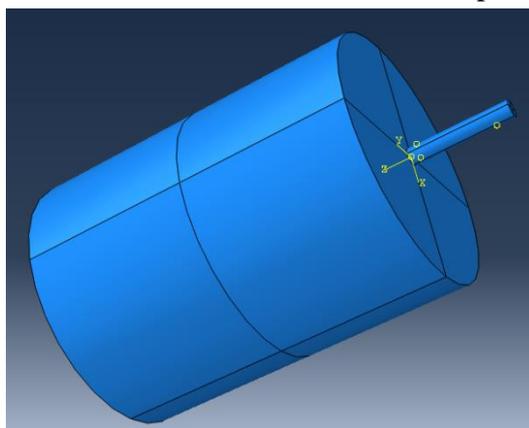
Figura 4.5 – Modelo do CP 150 mm



Fonte: Autor.

Seguindo a modelagem, foram definidos a união entre os corpos numéricos da barra e do CP por meio da etapa de *assembly* (conjunto) e do *step* (passo), onde foi criado o primeiro passo para inserção da carga obtida nos ensaios do trabalho do Rosales (2016). Como já mencionado no capítulo anterior, para a interação na interface foi utilizado a vinculação do tipo *tie*.

Figura 4.6 – Modelo da união entre barra e corpo de concreto

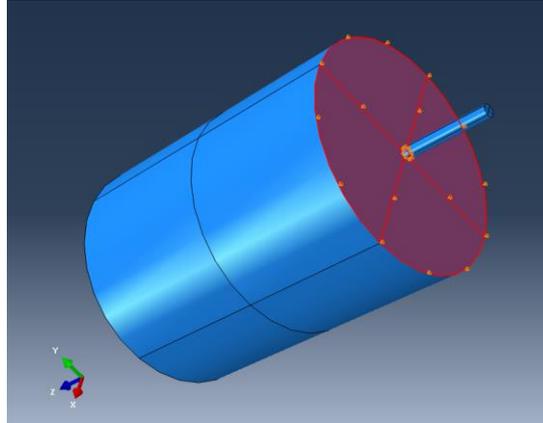


Fonte: Autor.

Como próximo passo foram inseridas as condições de contorno e restrição de movimento conforme se pode ver na Figura 4.7. Restringiu-se o deslocamento do CP de concreto na direção indicada de acordo com os dados dos ensaios adotados. Ao passo que também se

inseriu as forças de arracamento na barra por meio de tensões distribuídas uniformemente na direção negativa do eixo z.

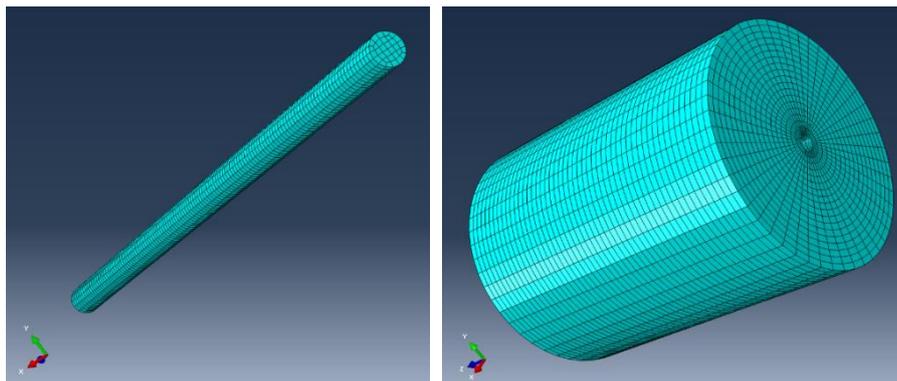
Figura 4.7 – Condição de Contorno e restrição de movimento em vermelho



Fonte: Autor.

Com a última etapa concluída partiu-se para a divisão dos dois volumes numéricos em elementos menores com a ferramenta *mesh* (malha), onde as barras foram divididas em elementos de *approximate global size* (tamanho aproximado global) de 2 mm, *curvature control* (controle de curvatura) de 0.1 e *minimun size control* (controle de tamanho mínimo) de 0.1. Seguido do último passo, que foi a execução do modelo e obtenção dos resultados com a ferramenta *job* (trabalho). Os CPs foram divididos em elementos em tamanhos de 4 mm.

Figura 4.8 – Malhas da barra de 10 mm e do CP de 150 mm



Fonte: Autor.

## 4.4 Resultados da modelagem

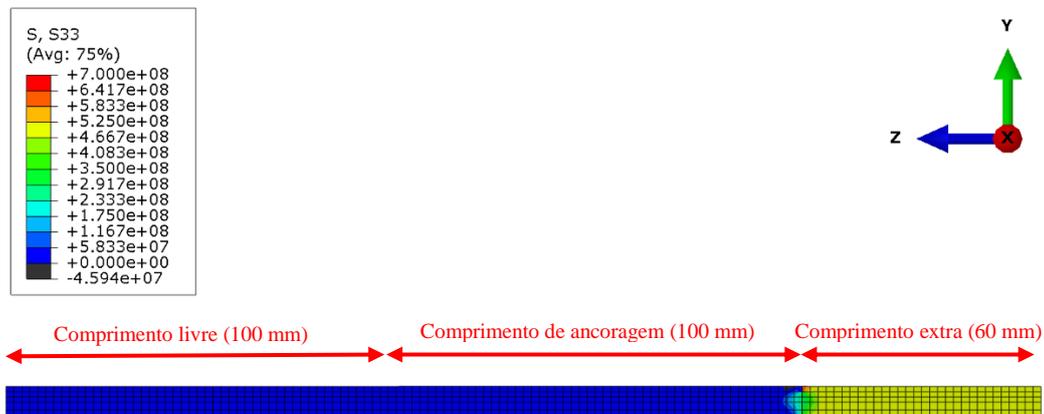
### 4.4.1 Efeito do diâmetro da barra

Como já mencionado em capítulos anteriores o diâmetro da barra é um dos fatores de grande importância que influenciam na ligação entre aço e concreto, bem como no comprimento de ancoragem. A seguir serão analisados os resultados da modelagem das barras e posteriormente dos corpos de prova submetidos aos ensaios de laboratório do trabalho utilizado como referência. As barras analisadas foram de 8, 10 e 12,5 mm com os CPs de 100 e 150 mm. As cargas aplicadas em cada modelo numérico simulado foram as cargas máximas obtidas nos ensaios de laboratório de Rosales (2016).

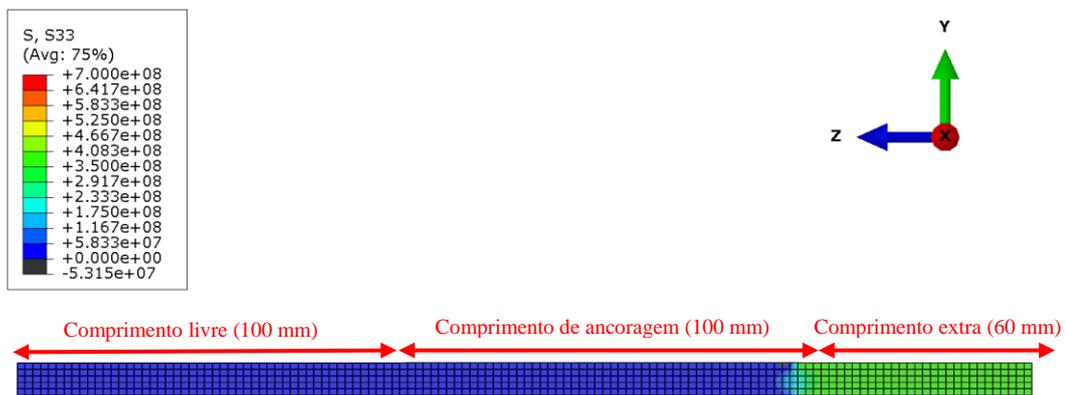
Na Figura 4.9 mostram-se a distribuição de tensões ao longo das barras para o corpo de prova de 100 mm. As tensões S33 (onde S significa *Stress*) mostradas nas figuras correspondem àquelas atuantes na face do plano z ao longo das barras na direção do eixo z, são decorrentes das forças de arrancamento máximas obtidas do trabalho do Rosales (2016).

Figura 4.9 – Barras de 8, 10 e 12,5 mm com CP de 100 mm

(a) Barra de 8 mm



(b) Barra de 10 mm



(c) Barra de 12,5 mm



Fonte: Autor.

Como se pode observar na figura acima, ao passo que os diâmetros das barras crescem as tensões máximas de arrancamento vão decrescendo, visto que no corpo de prova de 100 mm está associado a cobrimentos de camadas de concreto cada vez menores.

Dentre todos os CPs aquele que apresentou o menor cobrimento de concreto foi o modelo do CP de 100 mm com a barra de 12,5 mm. Esse menor cobrimento ocasiona tensões mais brandas de confinamento, que por sua vez influenciam nas tensões de aderência da ligação. Por isso o valor máximo de tensões dessa barra é o menor das três.

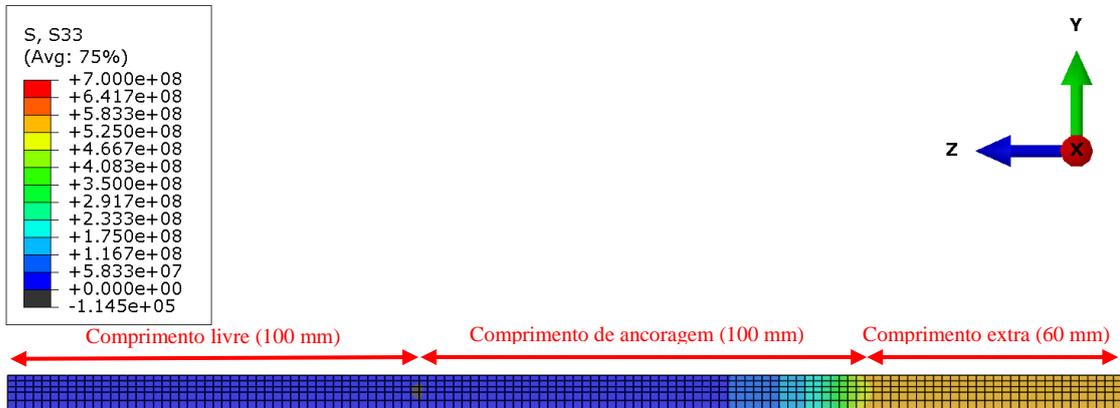
A barra de 8 mm foi a única que entre os modelos dos corpos de prova de 100 mm a ultrapassar a tensão de escoamento do aço de 561,2 MPa calculada pela pesquisa do Rosales (2016), a qual chegou na tensão máxima de 640,6 MPa. Como as tensões encontradas na barra foram maiores do que as de escoamento do aço, então, pode-se concluir a ruptura do corpo de prova por rompimento da barra de aço.

Por outro lado, as barras de 10 e 12,5 mm de diâmetro apresentaram tensões máximas ao longo do seu comprimento, respectivamente, iguais a 452,5 MPa e 400,6 MPa. Não havendo, portanto, atingindo as tensões de escoamento do aço obtidas por Rosales (2016) de 531,1 MPa para a barra de  $\phi 10$  e de 558,7 MPa para a de  $\phi 12,5$ . Desse modo, os modelos numéricos não apresentaram nas suas simulações as tensões superiores a escoamento do aço para estas barras, diferentemente, do que ocorreu no modelo citado no parágrafo anterior.

Esse mesmo resultado também é observado com os CPs de 150 mm, Figura 4.10. Apesar de haver aumento expressivo nas tensões máximas ao longo das barras, exceto na de 12,5 mm, que apresenta tensão menor quando comparado o CP 100\_12. Contudo, no geral, esse comportamento nas barras é mantido.

Figura 4.10 – Barras de 8, 10 e 12,5 mm com CP de 150 mm

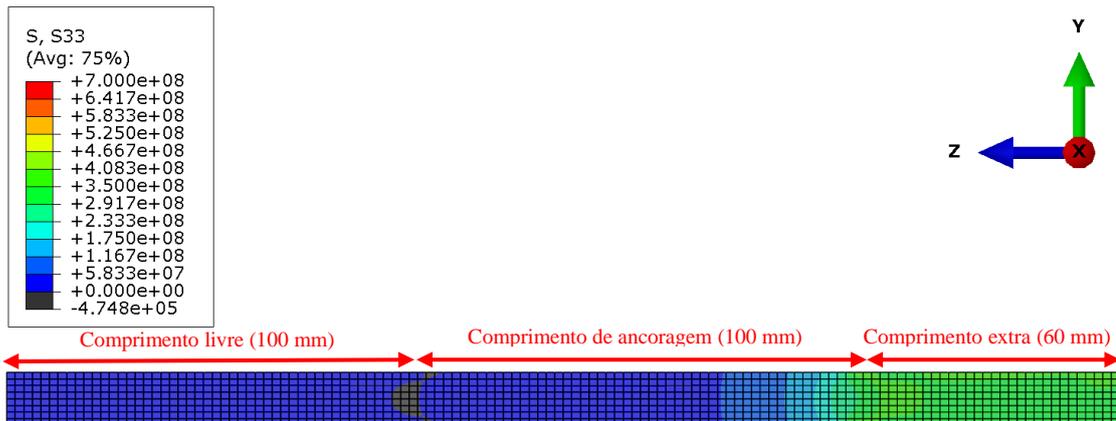
(a) Barra de 8 mm



(b) Barra de 10 mm



(c) Barra de 12,5 mm



Fonte: Autor.

Observa-se que a maior tensão na barra no momento da carga máxima do modelo está na de 8 mm para o CP de 150 mm, uma vez que menores diâmetros necessitam de menores comprimentos de ancoragem, consequentemente, a barra atinge as tensões de escoamento antes

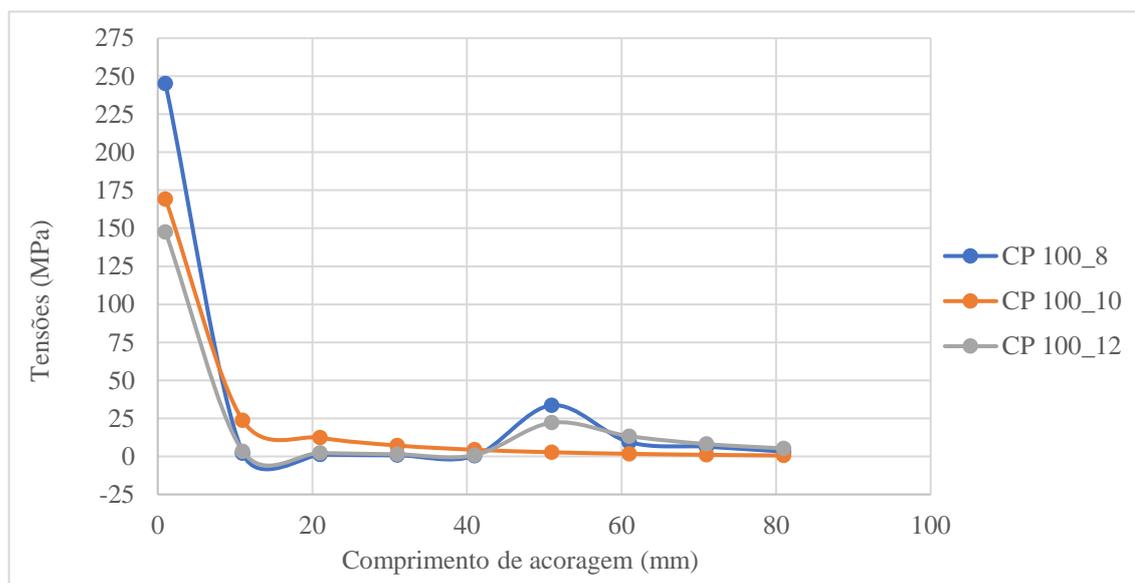
de romper a ligação com o concreto. Percebe-se que o comprimento de ancoragem e as tensões de confinamento são os responsáveis pelo aumento das forças necessárias extrair esse elemento de aço.

Em contrapartida, a diminuição do cobrimento de concreto ao redor da barra de 12,5 mm para os CPs de 100 e 150 mm provocam o efeito de redução nas tensões máximas, visto que há menos volumes de concreto, e portanto menores tensões de confinamento, sendo esses exemplos de modelos que apresentam rompimento na aderência entre aço e concreto.

Na Figura 4.11 são mostradas as tensões nas barras ao longo do comprimento de ancoragem das barras de 8, 10 e 12,5 mm de diâmetro, respectivamente, para os corpos de prova de 100 e 150 mm.

Os modelos foram compostos pela união dos dois modelos constitutivos, a barra de aço e o corpo de concreto, trabalhando em conjunto por meio na interface do tipo *tie*. Serão apresentados separadamente para o aço e para o concreto o comportamento das tensões ao longo do comprimento de ancoragem.

Figura 4.11 – Tensão vs comprimento de ancoragem para CP de 100 mm



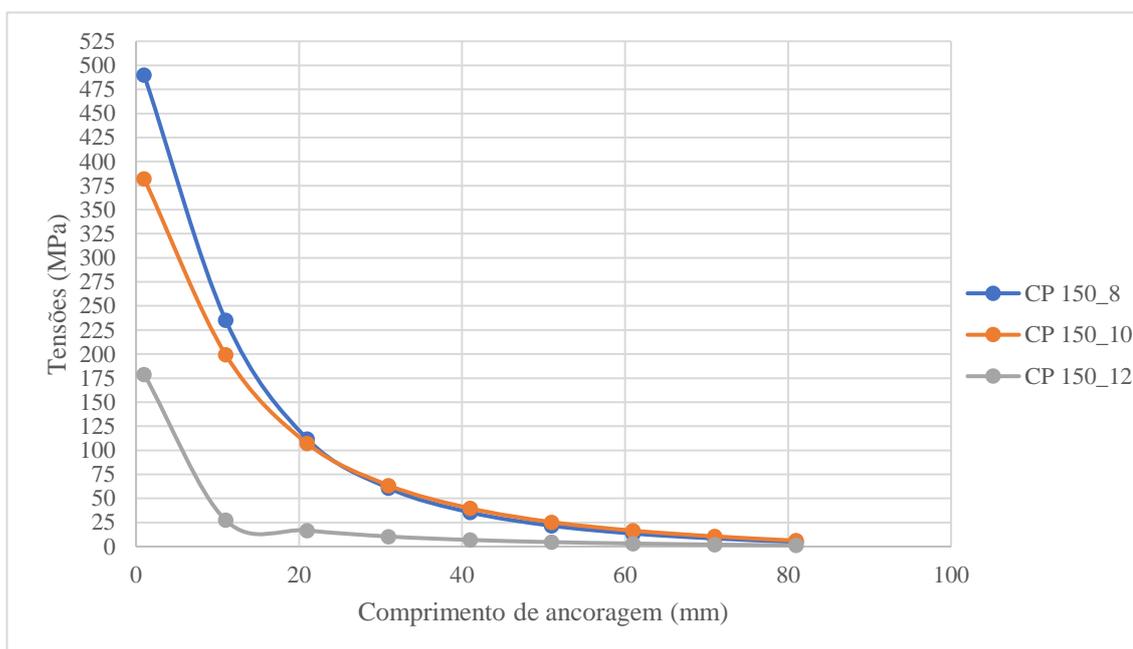
Fonte: Autor.

Pode-se notar que na Figura 4.11 as tensões obtidas ao longo das barras apresentaram um comportamento decrescente. Observa-se no decorrer do comprimento de ancoragem valores iniciais acentuados e um decaimento significativo logo nos primeiros 20 mm de comprimento, devido a concentração de tensões das forças de arrancamento e sua distribuição que vai diminuindo ao longo do comprimento de ancoragem.

Nota-se ainda a tendência de um leve aumento nos valores de tensões entre os 40 e 60 mm, mostrando a atuação das tensões de aderência na ancoragem. A convergência na diminuição gradual das tensões pode ser explicada pela redução do atrito que existe entre as nervuras das barras e o concreto circunvizinho.

Pode-se perceber que segundo os resultados obtidos nas simulações a barra de 8 mm, apresenta as maiores tensões entre todas as barras, uma vez que a necessidade e suficiência de um menor comprimento de ancoragem ocasiona escoamento antes de rompimento das ligações entre aço-concreto.

Figura 4.12 – Tensão vs comprimento de ancoragem para CP de 150 mm



Fonte: Autor.

Na Figura 4.12 vê-se um comportamento similar ao exposto nos dois parágrafos anteriores. Para os corpos de prova de 150 mm as tensões nas barras decrescem com o aumento do comprimento de ancoragem, tendo uma expressiva diminuição nos primeiros 20 mm. Observa-se também que as barras com maior confinamento de concreto, por causa da mudança do CP de 100 mm para 150 mm, apresenta um acréscimo nas suas tensões iniciais.

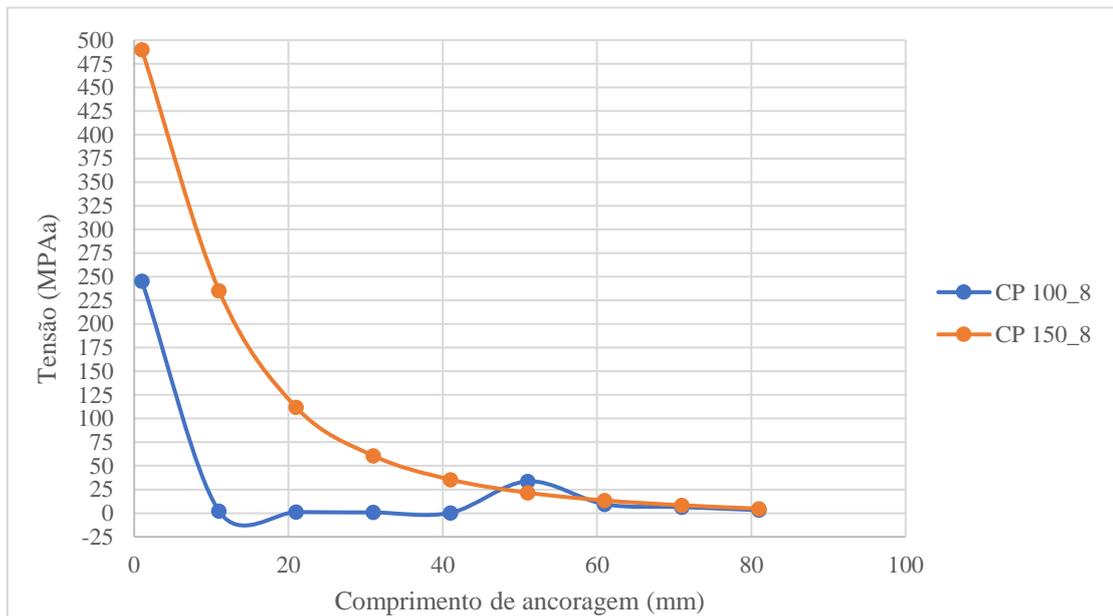
Para a barra de  $\phi 8$  mm houve um aumento das tensões iniciais de cerca de 250 MPa para quase 500 MPa, por sua vez, para as barras de  $\phi 10$  e  $\phi 12,5$  mm, a variação foi, respectivamente, de 175 MPa para cerca de 350 MPa e de 150 para aproximadamente 175 MPa. Concluiu-se, da mesma forma como citado acima, que o aumentado do diâmetro do corpo de prova de 100 para 150 mm, tem um impacto nas tensões de confinamento posto que uma maior camada de concreto corresponde a esse aumento. Com a ressalva de que para barra de aço de 12,5

mm há o menor aumento de tensões devido apresentar a menor camada de concreto ao redor da barra.

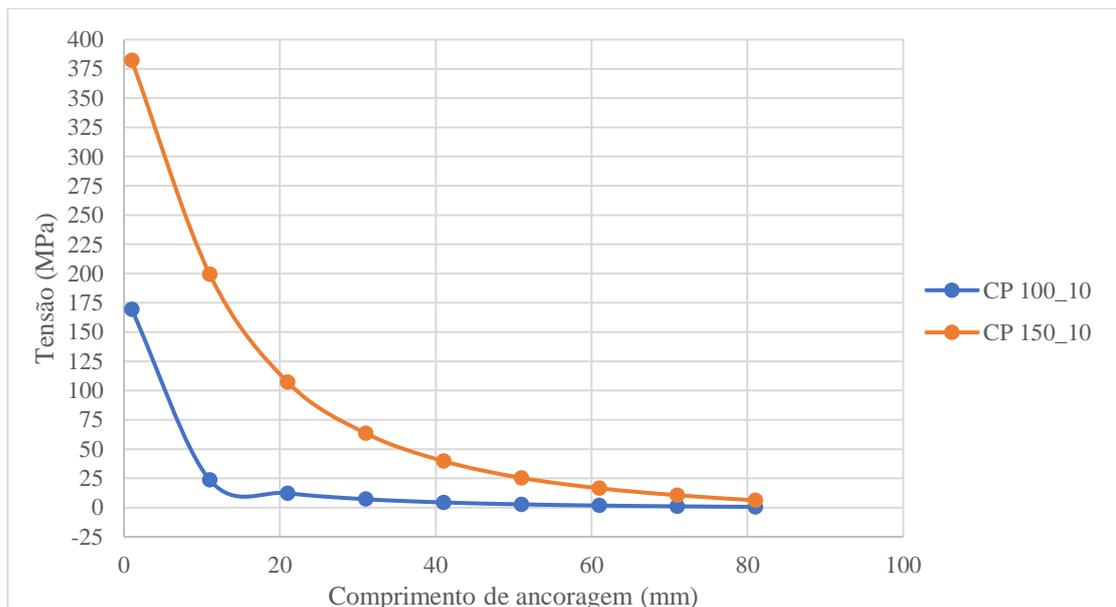
Contudo nota-se uma tendência dos valores das tensões de convergir para próximo de zero após os 60 mm de comprimento de ancoragem. É possível ver esse comportamento também quando se comparam na Figura 4.13, logo a seguir, para uma mesma barra as tensões para os diferentes corpos de prova.

Figura 4.13 – Distribuição de tensões nas barras para CP de 100 e 150 mm

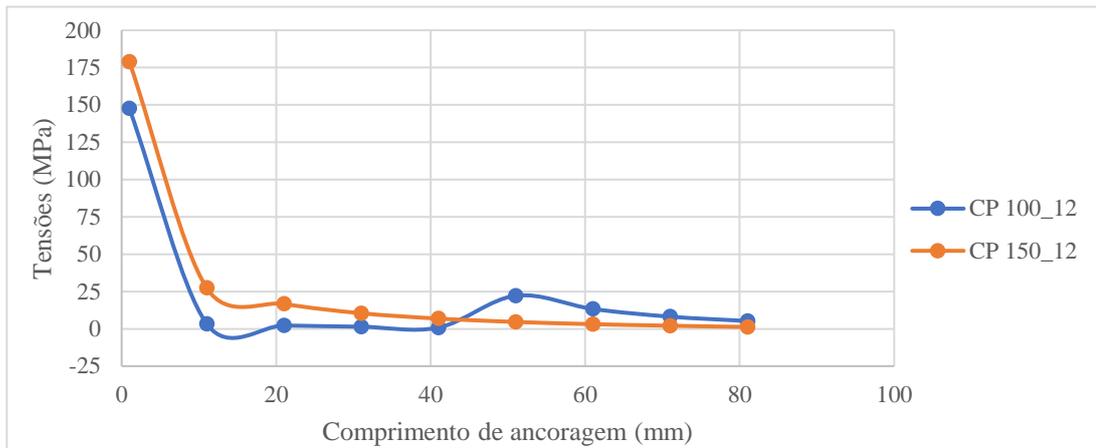
(a) Tensão vs comprimento de ancoragem para barra de  $\phi 8$  mm e CPs de 100 e 150 mm



(b) Tensão vs comprimento de ancoragem para barra de  $\phi 10$  mm e CPs de 100 e 150 mm



(c) Tensão vs comprimento de ancoragem para barra de  $\phi 12,5$  mm e CPs de 100 e 150 mm



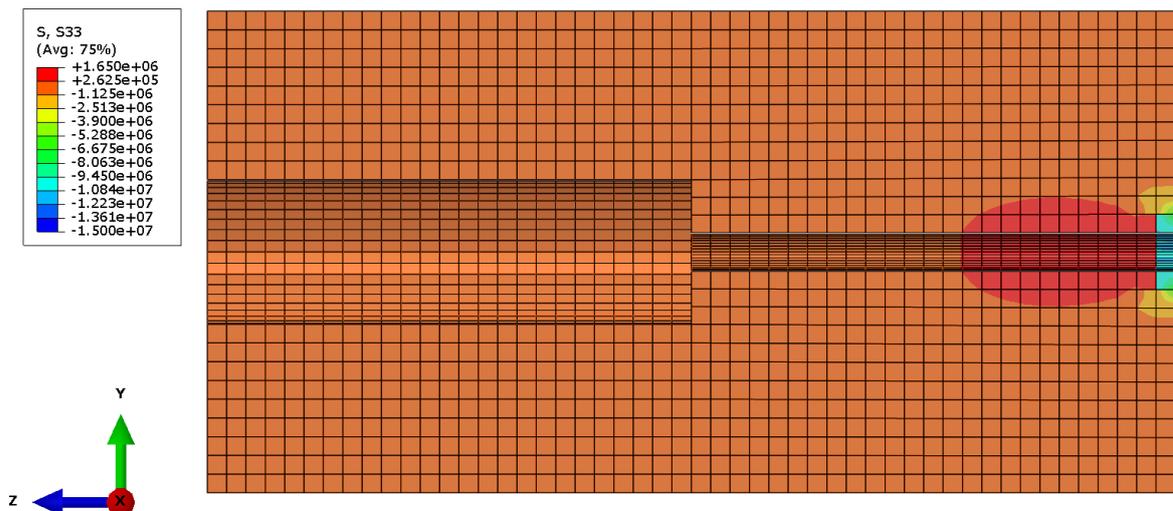
Fonte: Autor.

#### 4.4.2 Efeito do diâmetro dos corpos de prova

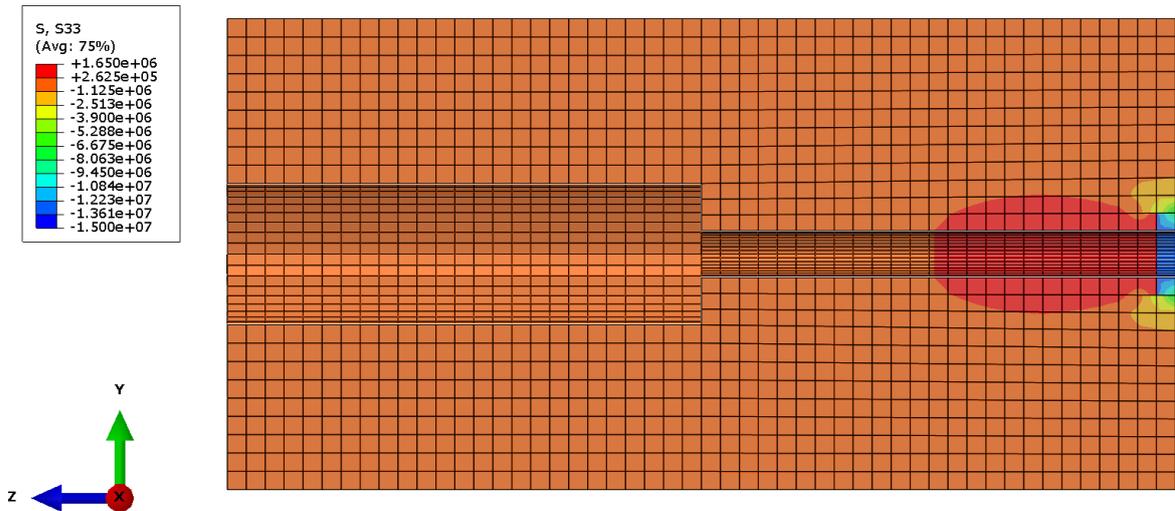
Outro fator importante para uma boa ancoragem é o cobrimento de concreto a qual as barras estejam submetidas. Uma vez que o aumento dos diâmetros dos corpos de prova aumenta a camada de concreto que envolvem as barras e por conseguinte a tensão de aderência. A seguir serão analisados os resultados da modelagem dos corpos de prova de concreto cilíndricos com diâmetros de 100 e 150 mm submetidos aos ensaios de laboratório do trabalho de Rosales (2016).

Figura 4.14 – Distribuição de tensões nos CPs de 100 mm

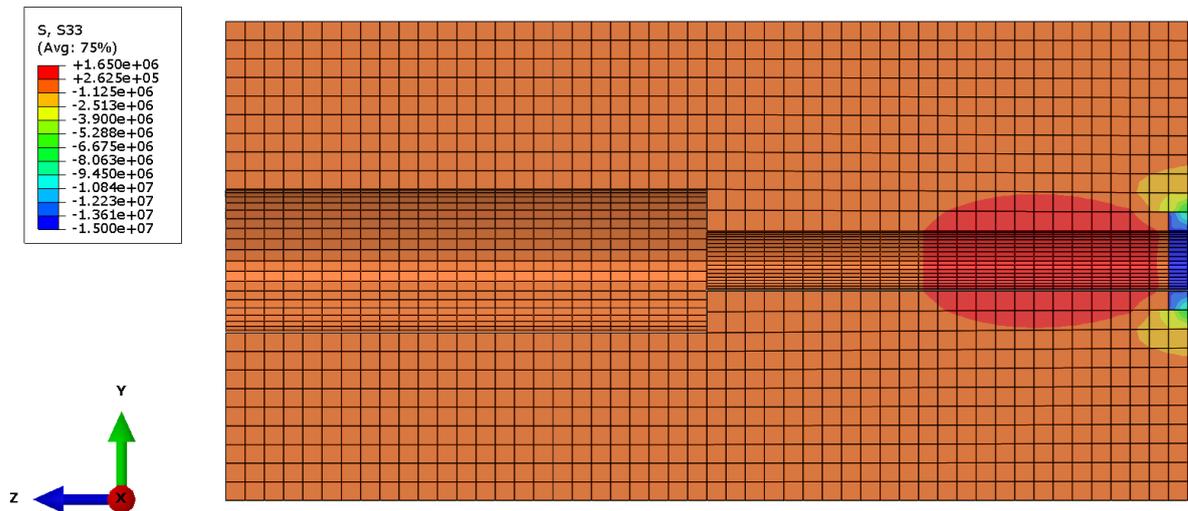
(a) Com barra de 8 mm



(b) Com barra de 10 mm



(c) Com barra de 12,5



Fonte: Autor.

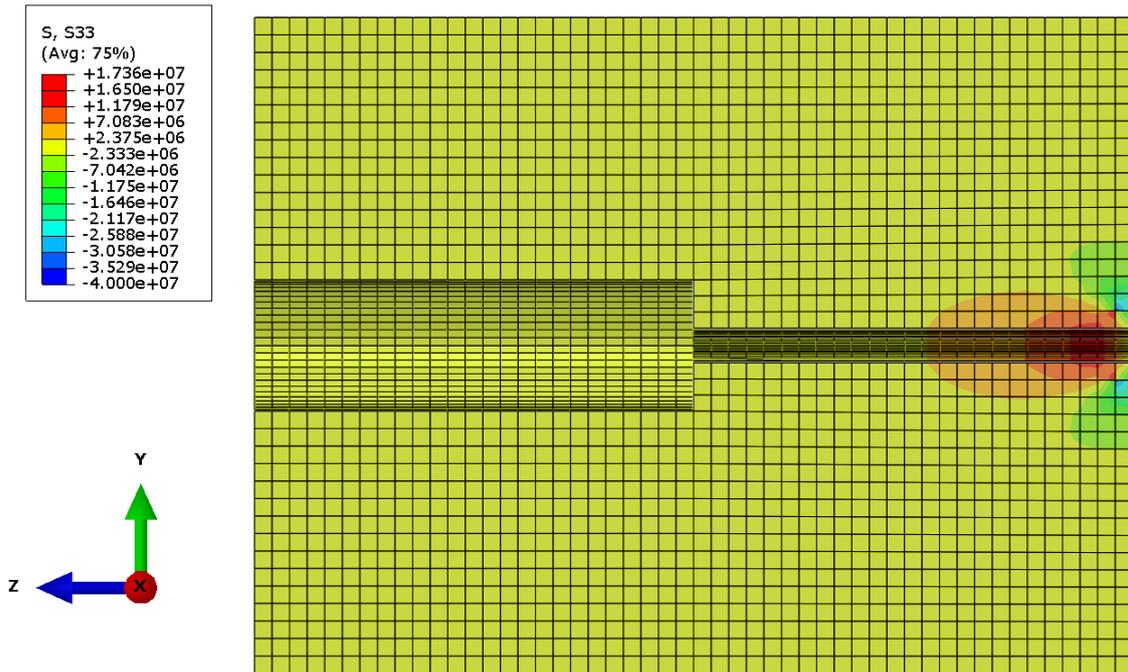
Pode-se perceber na Figura 4.14 que o aumento do diâmetro das barras gera bulbos de tensões (na cor vermelha) cada vez maiores, onde para os corpos de prova de 100 mm a barra de 12,5 mm apresenta a maior área em destaque. Devido a esse aumento na interface entre os materiais as solicitações provocadas pelo aço podem ser distribuídas em áreas maiores, que por sua vez se traduzem em maiores volumes no CP sujeitos a distribuição de tensões.

De forma análoga, os demais modelos numéricos CP de 150 mm apresentaram comportamentos semelhantes aos CPs de 100 mm. É possível ver na Figura 4.14 a distribuição de tensões afetando áreas cada vez maiores. Analisando visualmente nota-se que com camadas de

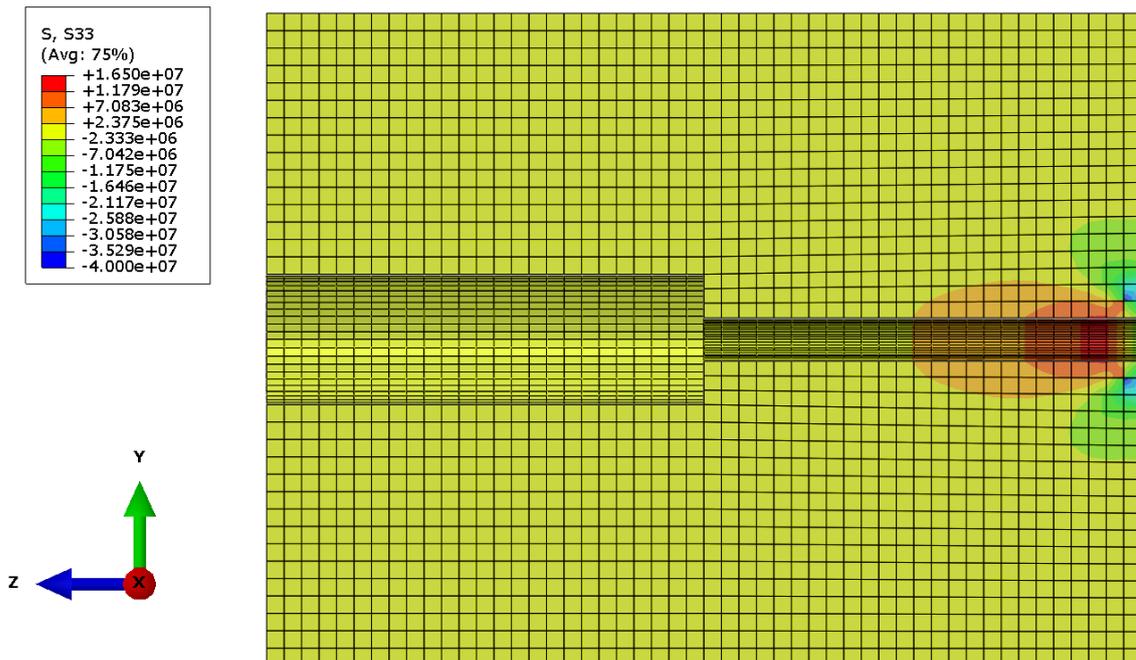
concreto maiores para um mesmo diâmetro de barra os bulbos tendem a serem menores, ocupando cada vez menos o comprimento de ancoragem, ou seja, há uma concentração dos bulbos mais próximos do início da ancoragem.

Figura 4.15 – Distribuição de tensões nos CPs de 150 mm

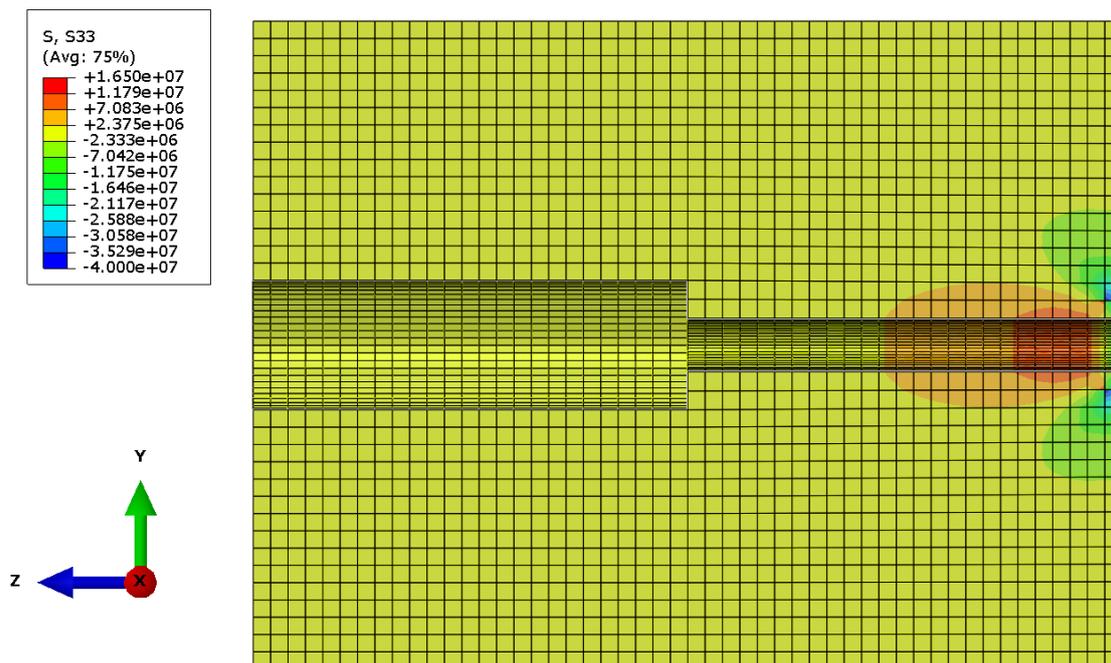
(a) Com barra de 8 mm



(b) Com barra de 10 mm



(c) Com barra de 12,5



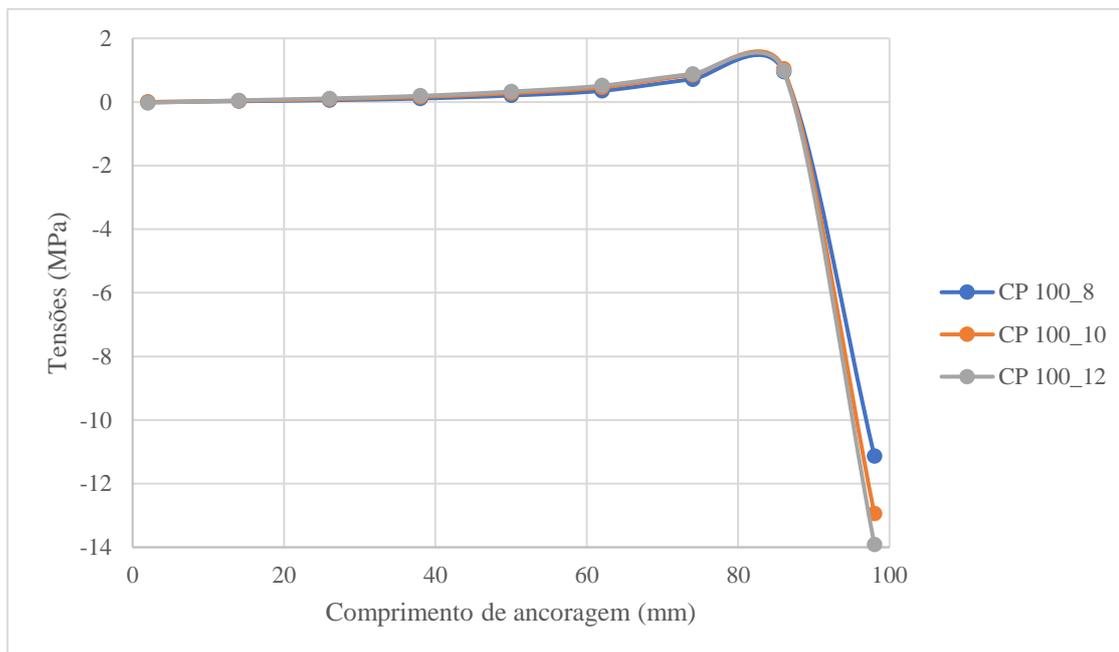
Fonte: Autor.

Na Figuras 4.16 e 4.17 logo a seguir são mostradas as curvas obtidas do comportamento das tensões nos CPs de 100 e 150 mm. Foram modelados numericamente o conjunto, contudo serão apresentadas nesta seção apenas as curvas do concreto e as respectivas tensões localizadas nas camadas de interface próximas as barras, as quais evoluem todo o comprimento de ancoragem.

As tensões obtidas ao longo desse comprimento apresentaram um leve crescimento, seguido de um pequeno pico nos valores e finalizando num decréscimo acentuado, como é possível ver nas Figuras 4.16 e 4.17. Nota-se um desenvolvimento similar no comportamento das tensões para todas as barras.

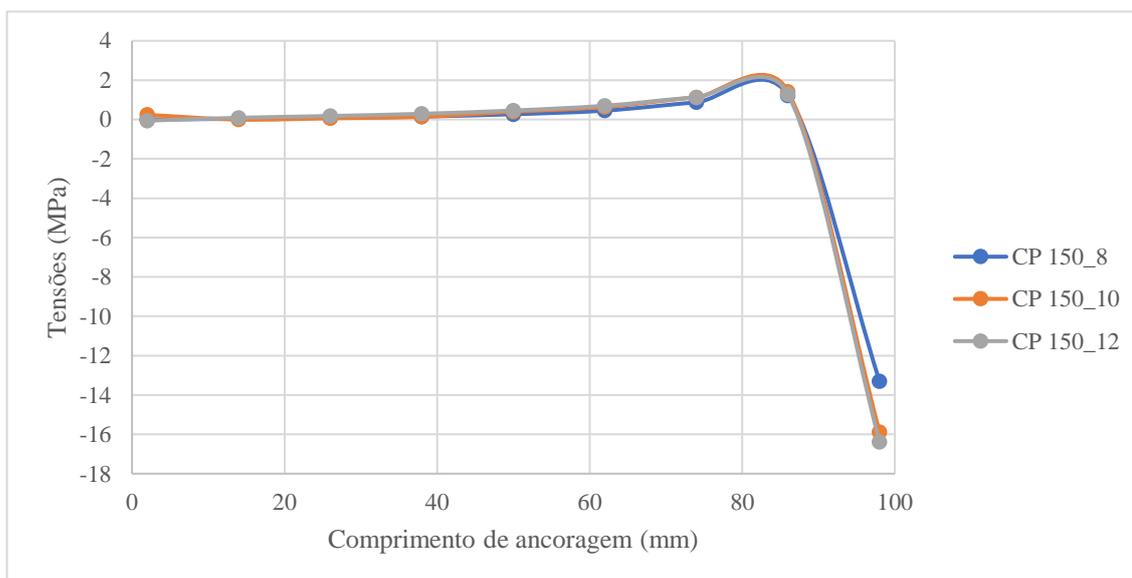
Os valores partem de próximo a zero no início e vai aumentando no decorrer do comprimento de ancoragem, chegando a próximo a 2 MPa em um pico e logo após os 80 mm apresenta um decaimento nas tensões, atingindo uma situação de compressão com valores de 11, 13 e 14 MPa para os diâmetros das barras de 8, 10 e 12,5 respectivamente, assim como mostra a Figura 4.16. Esse comportamento é análogo para os corpos de prova de 150 mm na Figura 4.17.

Figura 4.16 – Distribuição de tensões no concreto para CP de 100 mm



Fonte: Autor.

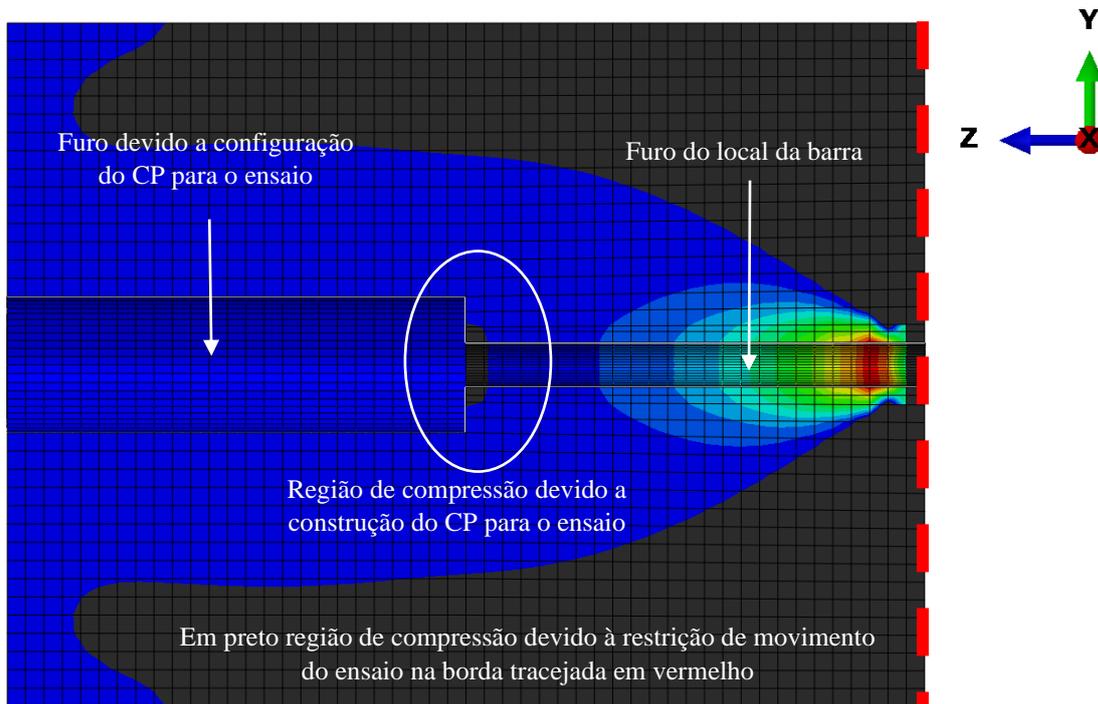
Figura 4.17 – Distribuição de tensões no concreto para CP de 150 mm



Fonte: Autor.

A presença de zona de compressão se deve as configurações geométricas dos corpos de prova preparados para os ensaios e das nervuras das barras que exercem diferentes ações no decorrer do comprimento, como ilustrada a Figura 4.18. Estão representadas na cor preta as tensões de compressão.

Figura 4.18 – Representação em corte da distribuição de tensões nos CPs



Fonte: Autor.

#### 4.5 Considerações finais

Adotaram-se algumas simplificações para facilitar a modelagem numérica e sua posterior simulação, onde não foi considerado os aspectos anisotrópicos do concreto e sua não linearidade, e a interface aço-concreto foi modelada como uma ligação *tie*, onde não ocorre o deslizamento das barras. Entretanto, apesar de tudo, com a modelagem obteve-se resultados bastante consistentes.

Pode-se perceber que ao passo que os diâmetros das barras crescem as tensões máximas de arrancamento vão decrescendo, visto que para o corpo de prova de 100 mm associa-se a cobrimentos de camadas de concreto cada vez menores. Fato visto no CP 100\_12, onde possui entre todos os modelos o menor cobrimento de concreto. Por isso, apresentou tensões mais brandas de confinamento, que por sua vez influenciam nas tensões de aderência da ligação.

Dentre os seis modelos os únicos em que atingiram tensões de escoamento nas barras foram os CP 100\_8 e CP 150\_8, ultrapassando com folga as tensões máximas do próprio aço. Pode-se, portanto, concluir que o rompimento dos corpos de prova nas simulações foi devido ao rompimento das barras de aço, e não por causa das do rompimento da aderência entre os materiais. Ambos modelos apresentaram os maiores cobrimento de concreto.

O aumento do diâmetro das barras gera bulbos de tensões cada vez maiores nos corpos de concreto ao longo do comprimento de ancoragem, onde para os corpos de prova de 100 mm a barra de 12,5 mm apresenta a maior área em destaque. Devido a esse aumento na interface entre os materiais as solicitações provocadas pelo aço podem ser distribuídas em áreas maiores, que por sua vez se traduzem em maiores volumes no CP sujeitos a distribuição de tensões.

Nota-se que com camadas de concreto maiores para um mesmo diâmetro de barra os bulbos de tensões tendem a ser menores, ocupando cada vez menos o comprimento de ancoragem e se distribuindo em uma menor área, ou seja, há uma concentração dos bulbos mais próximos do início da ancoragem para cobrimentos maiores de concreto.

## 5 CONCLUSÃO

Como objetivo principal este trabalho buscou por meio das análises analítica e numérica a obtenção do comportamento da aderência entre aço e concreto sob a variação dos diâmetros das barras e das camadas de concreto sobre elas. Buscou-se verificar qual seria o comportamento das tensões em vista dessas variações e principalmente qual a influência delas sobre o comprimento de ancoragem.

Os dados das tensões de aderência foram obtidos de forma analítica segundo a norma vigente. Percebeu-se que as tensões de aderência responsáveis por manter as barras unidas ao concreto segundo a NBR 6118:2014 não são influenciadas diretamente pelas tensões confinantes do seu cobrimento. De acordo com os dados obtidos para os diferentes casos as tensões permanecem constantes para cada um dos corpos, sejam eles de 100, de 150 e de 200 mm, sendo apenas dependentes de parâmetros como resistência do concreto e do diâmetro das barras.

Ainda sobre as forças de arrancamento, segundo os resultados analíticos em comparação com os dados da pesquisa do trabalho do Rosales (2016) há diferenças na magnitude do valor delas de no mínimo 63,6% entre as forças encontradas nos ensaios de laboratório daquelas encontradas pelos cálculos da norma citada. Observa-se, portanto, que as forças de arrancamento nas barras são capazes de resistir a valores muito maiores do que os obtidos nos cálculos. Diante disso, as tensões de aderência para uma mesma situação de diâmetro de barra e de CP de concreto são maiores nos dados dos ensaios e conseqüentemente o comprimento de ancoragem passa a ser menor.

Foram realizadas as simulações numéricas para observar o comportamento dos modelos numéricos. Para tal foi utilizado o *software* ABAQUS/CAE e sua biblioteca de MEF. A simulação da interface entre os materiais foi do tipo *tie*, uma relação de natureza mais rígida entre as superfícies.

O aumento do confinamento passivo, ou seja, do cobrimento de concreto é diretamente proporcional ao aumento das tensões de aderência. Desse modo, percebe-se que maiores resistências ou camadas de concreto provocam uma diminuição no comprimento de ancoragem. Assim, os acréscimos de concreto nos corpos de prova mostram um significativo aumento nas tensões máximas nos CPs de acordo com o aumento das camadas que envolvem as barras.

Nota-se ainda que as tensões residuais das barras, independentemente do seu diâmetro, diminuem ao longo do comprimento de ancoragem até tenderem a um mesmo valor. Portanto a partir de um certo comprimento de ancoragem não há mais colaboração entre do

concreto e aço para resistir aos esforços de arrancamento da barra, mesmo ocorrendo variações no cobrimento.

Este trabalho buscou trazer a importância do comportamento da ligação entre aço e concreto, por meio de discussões sobre comprimento de ancoragem, diâmetros das barras de aço e das tensões de confinamento passivo do concreto. O concreto armado é o método construtivo mais utilizado para a construção civil nos dias atuais, então é imprescindível ter o máximo de conhecimento sobre a relação entre esses materiais.

Outro ponto importante é poder ter as ferramentas computacionais como ótimas alternativas para se obter resultados sem depender exclusivamente de ensaios de laboratório, visto que elas conseguem reproduzir com exatidão bastante aproximada situações reais em ambientes de simulação.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

- Realizar mais simulações com uma quantidade maior de diâmetros de barra. E desse modo ter mais conhecimento sobre o comportamento das tensões de aderência para barras de aço com os mais variados diâmetros utilizados habitualmente em obras de concreto armado.
- Avaliar mais profundamente os efeitos do confinamento passivo sobre as barras e sua influência nas tensões de aderência, por meio da variação da espessura de cobrimento de concreto. Com isso obter mais detalhes sobre o ganho ou perda nas tensões de aderência com o aumento ou diminuição das camadas de concreto. Relacionar isso com a situações em projetos e obras de estruturas de concreto armado.
- Medir e avaliar o confinamento. Para isso, realizar ensaios de arrancamento com foco em medir os níveis de confinamento as quais as barras estejam sujeitas.
- Simular a partir de outros modelos constitutivos a distribuição de tensões e os efeitos no comprimento de ancoragem para demais barras de aço e mais variados cobrimentos de concreto. Considerando o comportamento não linear do concreto e o aparecimento de fissuras nessas simulações.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, S. F. de. **Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: SP, 165p, 2005.

ARAÚJO, L. C. P.; MORALES, L. L. D. **Modelagem computacional de corpos de prova submetidos à tração usando ABAQUS.** Escola de Engenharia, Universidade de Brasília: DF, 2019.

ARGENTA, L. A. Análise da aderência entre o concreto e barras de Fibras poliméricas de carbono (cfrp) via Método dos Elementos Finitos. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 8, n° 2, 2016.

BARBOSA, P. R. de O. **Análise probabilística de pilares de concreto armado através do método dos elementos finitos.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Porto Alegre: RS, 195p, 2017.

BRISOTTO, D. **Um Modelo Elasto-Plástico para a Análise da Aderência em Peças de Concreto Armado.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre: RS, 116p, 2011.

BOSCO, V. I. D.; SILVA, B. do V., TROIAN P. *et al.* Comparativo experimental entre os métodos de ensaios pull-out e push-out para determinação da tensão de aderência aço-concreto Experimental. 54º Congresso Brasileiro de Concreto (IBRACON). Maceió: AL, 2012.

CAETANO, L. F. **Estudo do Comportamento da ADERENCIA em Elementos de Concreto Armado Submetidos a corrosão e Elevadas Temperaturas.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre: RS, 153p, 2008.

CASTRO e SILVA, A. L. R de. **Análise numérica não-linear da flambagem local de perfis de aço estrutural submetidos à compressão uniaxial.** Tese de Doutorado, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: MG, 205p, 2006.

CARVALHO, R. C. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014. 4ed. São Carlos: EdUFSCar, 2021.

COUTO, J. C. C. Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concreto reforçado com fibras por meio do ensaio de viga. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão: SE, 124p, 2016.

DORIA, M. R. **Aderência concreto-concreto e aço-concreto em recuperação de estruturas de concreto armado.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão: SE, 86p, 2014.

FELIX, E. F. **Modelagem da Deformação do Concreto Armado Devido à Formação dos Produtos de Corrosão.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: SP, 162p, 2018.

FERNANDES, R. M. **A Influência das Ações Repetidas na Aderência Aço-Concreto**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos: SP, 155p, 2000.

FERNANDES, D.V. **Estudo da aderência de barras de aço coladas ao concreto com resina Epóxi**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: RJ, 160p, 2011.

FRANCO, M. I E. de. **Análise numérica de vigas mistas aço-concreto com protensão aderente e não aderente pelo método dos elementos finitos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: RS, 153p, 2018.

FRANÇA, V. H. **Aderência Aço-Concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira: SP, 125p, 2004.

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

GUIMARÃES, A. E. P. **Análise de pilares de concreto de alta resistência com adição de fibras metálicas submetidos à compressão centrada**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: SP, 145p, 1999.

LIMA, J. M. **Estudo experimental e numérico do comportamento de vigas mistas aço-concreto com conector treliçado**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília: DF, 163p, 2021.

LORENZI, A.; SILVA, B. V.; BARBOSA, M. P. *et al.* **Aplicação de redes neurais artificiais na predição da aderência aço-concreto em ensaios do tipo pull-out**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v.10, n° 5, p. 1051-1074, 2017.

MARTINS, J. V. R.; JACINTHO, A. E. P. G. A. **Estudo da aderência entre concreto e aço pelo ensaio apulot utilizando concreto de alta resistência**. Anais do IV Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, Campinas: SP, 2014.

MUZARDO, C. D.; PINHEIRO, L. M. **Aderência e ancoragem – capítulo 10**. Departamento de Engenharia de Estruturas, USP, São Paulo, 2003.

PAULO; R. N. **Modelagem numérica do comportamento de estrutura industrial de concreto armado pré-moldado**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação), Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2021.

PEREIRA, M. F.; CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA J. P. B. **Influência de parâmetros na modelagem de vigas de concreto armado**. Revista HOLOS, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal: RN, 2020.

PANTOJA ROSERO, B. G. **Análise Dinâmica de Estruturas de Concreto Armado via Elementos Finitos**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 167p, 2018.

ROSALES, Y. M. **Análise numérica - experimental do comportamento da aderência aço-concreto**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília: DF, 119p, 2016.

SANTANA, I. V. Estudo da influência das fibras metálicas no comportamento de aderência entre barras de aço e concreto de diferentes classes de resistência. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós- Graduação em Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: SP, 146p, 2014.

SIGNORI, A. L. **Análise da influência do adensamento do concreto frente à resistência de aderência entre aço e concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS. São Leopoldo: RS, 84p, 2018.

SILVA, H. P. da. **Simulação numérica do comportamento de conectores de cisalhamento tipo crestbond**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa: MG, 109p, 2013.

SORIANO, H. L.; LIMA, S.S. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

TAVARES, A. J. **Aderência aço-concreto: análise numérica dos ensaios pull-out e APU-LOT**. Dissertação de Mestrado (Em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Materiais e Processos de Fabricação. Ilha Solteira: SP, 141p, 2012.