

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MATHEUS MACHADO COSTA

**ANÁLISE NUMÉRICA DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO DE BARRAS DE AÇO
EMBEBIDAS EM CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

**Alegrete
2021**

MATHEUS MACHADO COSTA

**ANÁLISE NUMÉRICA DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO DE BARRAS DE AÇO
EMBEBIDAS EM CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Dr. Ederli Marangon

Coorientador: Me. Leandro F. Friedrich

**Alegrete
2021**

MATHEUS MACHADO COSTA

**ANÁLISE NUMÉRICA DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO DE BARRAS DE AÇO
EMBEBIDAS EM CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 29/04/2021.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ederli Marangon
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Me. Leandro Ferreira Friedrich
Coorientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Marco Antônio Durlo Tier
Examinador
UNIPAMPA

Eng. Camila Vargas Cardoso
Examinador
UNIPAMPA

Dedico este trabalho à minha família pelo apoio que sempre me deram na busca dos meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Especialmente, à minha família pelo apoio ao longo de toda a graduação. Ao meu pai, Paulo, por sempre me incentivar e nunca medir esforços pra me auxiliar na busca deste objetivo. À minha mãe, Nara, por nunca me deixar desistir e sempre estar presente nos momentos que mais precisei. Ao meu segundo pai, meu irmão Alexandre, por ser o meu parceiro em todos os momentos e sempre me incentivar. À minha cunhada, Jocieli, pelas diversas formas com as quais sempre me ajudou. Às minhas sobrinhas, Sophia e Antonella, por serem uma das minhas fontes de energia e meu ponto de paz. Esta conquista não é só minha, mas também é de vocês. Vocês são minha base e eu nunca vou esquecer a frase: “Não te preocupa, que a gente dá um jeito aqui”, incentivando-me incondicionalmente a seguir os meus sonhos e superando todas as dificuldades ao meu lado.

Aos amigos de Rosário, o famoso “BDJ”, pelo incentivo, amizade e companheirismo durante todos esses anos. Aos colegas de graduação, companheiros de desespero, de dias e noites de estudo, pelo companheirismo e por todas as contribuições que tiveram ao longo dessa caminhada. Em especial ao Bernardo, à Mayara, à Gabriela, à Andressa, o Rafael e à Carolina.

Aos demais familiares que sempre me ajudaram e incentivaram-me a seguir em frente, principalmente o tio Luís Carlos.

Ao meu orientador professor Ederli, pela orientação neste trabalho, pelos ensinamentos profissionais e pessoais, e por sempre incentivar o meu interesse pela pesquisa e de seguir na área acadêmica.

Ao meu coorientador professor Leandro, pela orientação neste trabalho, pelo incansável apoio durante as simulações numéricas, por não desistir quando parecia que não ia dar certo e por me ajudar a entender essa “Caixa preta”, chamada de elementos finitos.

À Camila Cardoso, companheira de pesquisa, por sempre estar disposta a ajudar e pelas valiosas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho desde o início.

Ao Marco Tier, membro da banca, pelas valiosas contribuições para aperfeiçoamento deste trabalho.

Aos demais professores pelos conhecimentos transmitidos a mim durante a graduação.

RESUMO

A existência do concreto armado está diretamente relacionada a aderência, pois é este mecanismo que garante a reciprocidade dos materiais, concreto e aço, na reação aos esforços impostos. Geralmente, a aderência é investigada experimentalmente a partir do ensaio de arrancamento, proposto pela RILEM-FIP-CEB (1973), que consiste no arrancamento de uma barra posicionada no centro da seção transversal de um prisma de concreto. Para colaborar com os estudos experimentais realizados em laboratório, a análise numérica pode ser desenvolvida, empregando o método dos elementos finitos com a utilização do programa ANSYS. A técnica permite extrapolar a investigação para outras aplicações com menor custo e tempo hábil. Nesta pesquisa, foi realizada a análise numérica com base em dados de resultados experimentais disponíveis na literatura para arrancamento de barras de aço de 10mm de diâmetro, os quais utilizaram concreto autoadensável com resistência à compressão de 30 MPa. A interface de contato entre o concreto e a barra é o problema a ser resolvido nas simulações numéricas. Portanto, foram adotadas duas abordagens distintas: aplicação de elementos de contato e material de zonas coesivas (CZM), e o modelo de molas. Os resultados numéricos foram validados a partir dos dados experimentais e ainda comparados com a análise numérica realizada pelo mesmo autor dos estudos experimentais. As curvas numéricas obtidas neste trabalho, principalmente utilizando o modelo de molas para simular o contato entre os materiais aço e concreto, apresentaram um comportamento da curva força de arrancamento *versus* deslizamento próximo ao que fora obtido experimentalmente e, além disso, o pico da força de arrancamento apresentou uma diferença máxima de 0,80% entre os modelos numéricos usados nesta pesquisa e a força média obtida experimentalmente. Com isso, colaborando com a análise numérica existente dos dados experimentais utilizados como referência, pois a mesma havia subestimado a força de arrancamento em aproximadamente 25,1%, e a curva numérica apresentava algumas discrepâncias quando comparadas à curva experimental.

Palavras chaves: concreto armado; concreto autoadensável; aderência; ensaio de arrancamento; método dos elementos finitos; ANSYS.

ABSTRACT

The existence of reinforced concrete is directly related to adherence, as it is this mechanism that guarantees the reciprocity of materials, concrete and steel, in reaction to the imposed efforts. Generally, the adherence is investigated experimentally from the pullout test, proposed by RILEM-FIP-CEB (1973), which consists in the pullout of a bar positioned in the center of the cross section of a concrete prism. To collaborate with experimental studies performed out in the laboratory, numerical analysis can be developed, using the finite element method using the ANSYS program. The technique allows to extrapolate the investigation to other applications with less cost and time. In this research, a numerical analysis was performed based on data from experimental results available in the literature for pulling out 10 mm diameter steel bars, which used self-compacting concrete with compressive strength of 30 MPa. The contact interface between the concrete and the bar is the problem to be solved in the numerical simulations. Therefore, two different approaches were adopted: application of contact elements and material from cohesive zones (CZM), and the model of springs. The numerical results were validated from the experimental data and also compared with a numerical analysis carried out by the same author of the experimental studies. The numerical curves obtained in this work, mainly using the spring model to simulate the contact between the steel and concrete materials, showed a pullout force versus slip curve behavior close to what was experimentally reported and, in addition, the peak pullout force. presentation a maximum difference of 0.80% between the numerical models used in this research and the average force obtained experimentally. Thus, collaborating with the existing numerical analysis of the experimental data used as a reference, since it had underestimated the pullout force by approximately 25.1%, and the numerical curve showed some discrepancies when compared to the experimental curve.

Keywords: reinforced concrete; self-compacting concrete; adherence; pullout test; finite element method; ANSYS.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Fluxograma da solução por MEF. | 20 |
| Figura 2 – Parcelas de Aderência: a) aderência por adesão; b) aderência por atrito e c) aderência mecânica. | 25 |
| Figura 3 – Tipos de ruptura de aderência: ruptura do aço, deslizamento das barras de aço e ruptura por fendilhamento..... | 25 |
| Figura 4 – Distribuição de tensões do ensaio de arrancamento..... | 26 |
| Figura 5 – Dimensões e considerações para a produção dos corpos de prova, conforme a RILEM-FIP-CEP (1973)..... | 27 |
| Figura 6 - Diagrama força x deslizamento para barra de 8,0mm e concreto de resistência à compressão de 49,3MPa. | 28 |
| Figura 7 - Diagrama força x deslizamento para barra de 10,0mm e concreto de resistência à compressão de 49,3MPa. | 29 |
| Figura 8 - Diagrama força x deslizamento para barra de 12,5mm e concreto de resistência à compressão de 49,3MPa. | 29 |
| Figura 9 – Gráficos com as curvas de tensão versus deslizamento para elementos cúbicos de concreto. (a) Com barra de diâmetro de 8mm. (b) Com barra de diâmetro de 10mm. | 30 |
| Figura 10 – Curvas de força versus deslizamento para dados encontrados por Sena-Cruz et al. (2009) e CEB-FIP <i>Model Code-90</i> aos 28 dias. (a) Aço galvanizado + epóxi. (b) Aço galvanizado. (c) Aço convencional. | 32 |
| Figura 11 – Gráficos de comparação dos resultados, a partir de curvas de força versus deslizamento, para concreto da classe C30 e barras de 10mm e 16mm, respectivamente. | 33 |
| Figura 12 – Gráficos de comparação dos resultados, a partir de curvas de força versus deslizamento, para concreto da classe C60 e barras de 10mm e 16mm, respectivamente. | 33 |
| Figura 13 – Resultados experimentais e numéricos para espécimes com concreto autoadensável de classe de resistência à compressão de 30MPa e barra de 10mm. | 35 |
| Figura 14 – Espécimes para <i>pull-out test</i> | 37 |
| Figura 15 – Curvas experimentais de força versus deslizamento para o ensaio de arrancamento. | 38 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 16 – Simplificação do modelo 3D..... | 39 |
| Figura 17 – Locais de aplicação do deslocamento e restrições no ANSYS..... | 40 |
| Figura 18 – SOLID65..... | 40 |
| Figura 19 – SOLID45..... | 41 |
| Figura 20 – Malha de elementos finitos..... | 43 |
| Figura 21 – Superfície de contato entre concreto e barra de aço..... | 44 |
| Figura 22 – Material de Zonas Coesivas Bi linear..... | 45 |
| Figura 23 – Modelo geométrico aplicando modelo de molas..... | 46 |
| Figura 24 – Região de interface com elementos de mola não lineares..... | 47 |
| Figura 25 – Molas efetivas..... | 48 |
| Figura 26 – Três comportamentos típicos da curva de arrancamento de fibra/barra de aço..... | 48 |
| Figura 27 – Funções adotadas e seus respectivos trechos de aplicação..... | 50 |
| Figura 28 – PLANE 182..... | 50 |
| Figura 29 – COMBIN40..... | 51 |
| Figura 30 – Malha de elementos finitos..... | 52 |
| Figura 31 – Comparação entre os resultados de Almeida Filho (2006) e o modelo numérico aplicando CZM com $\tau_{máx} = 14,34 MPa$ e $U_t=8mm$ | 53 |
| Figura 32 – Comparação entre os resultados de Almeida Filho (2006) e o modelo numérico aplicando CZM com $\tau_{máx} = 10,9MPa$ e $U_t=8mm$ | 54 |
| Figura 33 – Comparação entre o resultado experimental de Almeida Filho (2006) e o modelo numérico aplicando CZM com $\tau_{máx} = 10,9MPa$ e U_t variando em 2,5 mm, 8 mm, 20 mm e 33 mm..... | 55 |
| Figura 34 – Comparação entre os resultados experimentais e numéricos de Almeida Filho (2006) e o modelo numérico aplicando CZM com $\tau_{máx} = 10,9MPa$ e $U_t=33mm$ | 56 |
| Figura 35 – Comparação entre as curvas experimental e numéricas aplicando o modelo de molas com funções: $\tau s = -33,891 s^2 + 47,473 s + 0$ e $\tau s = -23,158 s^2 + 33,474 s + 0$ | 57 |
| Figura 36 – Comparação entre as curvas experimental e numéricas aplicando a Equação de Fantilli e Vallini (2003) com valores para k_c de 0,25, 0,75, 1 e 2..... | 58 |
| Figura 37 – Comparação entre os resultados experimentais e numéricos de Almeida Filho (2006) e o modelo numérico aplicando o modelo de molas com $k_c = 0,75$ | 59 |
| Figura 38 – Campo de tensões em MPa na direção z para a matriz de concreto..... | 60 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 39 – Campo de tensões em MPa na direção z para a barra de aço. | 61 |
| Figura 40 – Campo de tensões em MPa na direção x para barra de aço e concreto aplicando-se o modelo de molas, durante a descolagem. | 62 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|-----------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Composição da mistura..... | 36 |
| Tabela 2 – Propriedades da mistura aos 7 dias. | 37 |
| Tabela 3 – Tipos de elementos | 41 |
| Tabela 4 – Propriedades dos materiais no ANSYS..... | 42 |

LISTA DE ABREVIATURAS

ANSYS – *Analysis Systems Incorporated*

APDL – *ANSYS Parametric Design Language*

ATENA – *Advanced Tool for Engineering Nonlinear Analysis*

CAA – *Concreto Autoadensável*

CC- *Concreto Convencional*

CEB – *Comité Euro-International du Béton*

CZM - *Cohesive zone material*

FIP – *Federation Internationale de la Précontrainte*

MC – *Model Code*

MEF – *Método dos Elementos Finitos*

RILEM – *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*

LISTA DE SÍMBOLOS

V_p – Velocidade de carregamento

Φ – Diâmetro nominal da barra de aço

τ_b – Tensão de aderência

P – Força de tração

f_{cm} – Resistência à compressão

K_i – Rigidez inicial da mola com deslocamento ($s=0$)

$P_{m\acute{a}x}$ – Carga máxima de arrancamento antes que seja completo o processo de descolagem

d – Diâmetro da fibra ou barra de aço

L_e – Comprimento embutido

$n(s)$ – Número de molas efetiva

$\tau_{m\acute{a}x}$ – Tensão de cisalhamento máxima

s – Deslocamento aplicado

s_1 – Deslocamento aplicado imediatamente antes de ocorrer a descolagem por completo

k_c – Coeficiente que governa o comportamento de arrancamento

τ_{fin} – Valor assintótico da tensão de cisalhamento

SUMÁRIO

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 Objetivos | 17 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 18 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos | 18 |
| 1.2 Justificativa | 18 |
| 1.3 Organização do trabalho | 19 |
| 2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA | 20 |
| 2.1 Método dos elementos finitos | 20 |
| 2.1.1 ANSYS | 21 |
| 2.1.1.1 Aplicação do ANSYS | 22 |
| 2.2 Mecanismo de Aderência | 24 |
| 2.2.1 Ensaio de arrancamento (<i>pull-out test</i>) | 25 |
| 2.3 Análise Numérica para Ensaio de Arrancamento | 28 |
| 3 METODOLOGIA | 35 |
| 3.1 Dados experimentais | 35 |
| 3.1.1 Composição e propriedades mecânicas | 36 |
| 3.1.2 Corpos de prova | 37 |
| 3.1.3 Ensaio de Arrancamento | 37 |
| 3.2 Análise Numérica | 38 |
| 3.2.1 Modelo de contato + Material de Zonas Coesivas | 39 |
| 3.2.1.1 Modelo 3D | 39 |
| 3.2.1.2 Tipos de elementos e comportamento dos materiais | 40 |
| 3.2.1.3 Malha | 42 |
| 3.2.1.4 Material de Zonas Coesivas | 44 |
| 3.2.2 Modelo de molas | 46 |
| 3.2.2.1 Tipo de Elemento | 50 |
| 3.2.2.2 Malha | 51 |
| 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS | 53 |
| 4.1 Análise numérica aplicando o Modelo de contato + Materiais de Zonas Coesivas (CZM) | 53 |
| 4.2 Análise numérica aplicando o Modelo de molas | 56 |
| 4.3 Considerações finais | 59 |

| | |
|---------------------------|-----------|
| 5 CONCLUSÕES | 63 |
| REFERÊNCIAS..... | 66 |

1 INTRODUÇÃO

O concreto é, mundialmente, o material estrutural mais empregado na construção civil, em virtude de possuir baixo custo, diversos métodos de produção e possibilidade das peças moldadas serem produzidas com formas variadas. Entretanto, apesar de sua boa resistência à compressão, o concreto simples apresenta limitações, por exemplo, seu comportamento frágil e baixa resistência à tração. Diante disso, criou-se a adaptação denominada de concreto armado, onde são embebidas no concreto barras de aço para suportar os esforços de tração, tornando-se um modo eficaz e muito difundido para contornar as limitações anteriormente apresentadas (FIGUEIREDO, 2011).

A existência do concreto armado está diretamente ligada ao fenômeno da aderência, que é responsável pela transferência de tensões e convergência de deformações entre os constituintes. Ao submeter o compósito à tração, é o fenômeno da aderência que impede o deslocamento da barra, em relação ao concreto, pois o concreto apresenta baixa resistência à tração. Na existência da aderência, o trabalho é conjunto na reação aos esforços de tração, em outros termos, o aço é responsável por resistir à tração e o concreto por reduzir a intensidade da fissuração no entorno da barra. Então, quanto maior a aderência, maior será a probabilidade de desenvolvimento de fissuras com menores aberturas, o que aumenta o tempo de união entre os materiais (SILVA, 2006).

O concreto autoadensável (CAA) é dosado com o intuito de obter uma mistura com grande fluidez e trabalhabilidade, o que acarreta em um melhor preenchimento dos espaços das fôrmas, principalmente se estiverem densamente armadas. Diante disso, possivelmente melhora o envolvimento das barras de aço, o que beneficia diretamente a resistência de aderência entre a barra de aço e o concreto.

Na análise experimental da aderência podem ser empregados diferentes tipos de ensaios. Contudo, o mais difundido é o ensaio de arrancamento (*pull-out test*), proposto pela *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages – Federation Internationale de la Précontrainte - Comité Euro-International du Béton* (RILEM-FIP-CEB) em 1973. Este procedimento é muito utilizado devido as vantagens apresentadas pelo método. Segundo Simplício (2008), o ensaio é de fácil execução, os corpos de prova são simples de serem

produzidos e é possível utilizar em pesquisas com diferentes tipos de concreto e diâmetros de barras.

Por outro lado, nem sempre é possível realizar vários experimentos, seja pelo custo, pelas dimensões dos elementos, disponibilidade de equipamentos, ou pelo tempo necessário para obtenção dos dados. Portanto, ferramentas computacionais tornam-se as maiores aliadas dos projetistas e pesquisadores, afim de auxiliar o estudo do comportamento obtido experimentalmente e proporcionar a extrapolação da análise para outras aplicações. Nesse sentido, o método dos elementos finitos (MEF) é uma excelente ferramenta computacional para resolver problemas complexos. A aplicação deste recurso é bastante ampla, pode-se citar por exemplo, o ramo das engenharias devido as possibilidades que ele oferece, como análise de tensões e deformações, análises térmicas, análise de fluídos, entre outras.

De acordo com Soriano e Lima (2003), o que proporcionou o desenvolvimento do método dos elementos finitos foi a área de análise de estruturas e foi esta a qual mais se desenvolveu. Desse modo, no projeto de estruturas contínuas e/ou arrojadas, o uso deste método numérico torna-se cada vez mais recorrente.

Apesar de existir uma grande variedade de estudos relacionados à aderência aço/concreto na literatura, a maioria das pesquisas realizaram somente a análise experimental, e os trabalhos que possuem análises numéricas são encontrados em menor quantidade e alguns apresentam resultados que podem ser melhorados, e enfatizam que os modelos numéricos devem ser mais estudados.

O presente trabalho visa, a partir de dados experimentais disponíveis na literatura, analisar numericamente o comportamento da aderência entre barras de aço e o concreto autoadensável, devido sua particularidade que gera uma melhora da interface. Em suma, pretende-se elaborar modelos numéricos computacionais, validados a partir de dados experimentais, ou seja, com resultados condizentes aos obtidos em experimentos de laboratório, com o intuito de contribuir com as pesquisas realizadas ou a serem efetuadas em relação ao mecanismo da aderência em estruturas de concreto armado.

1.1 Objetivos

O objetivo geral e os específicos desta pesquisa são apresentados na sequência, nos itens 1.1.1 e 1.1.2, respectivamente.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar, através de análises numéricas, o comportamento da aderência entre barras de aço e o concreto autoadensável usando como referência dados experimentais disponíveis na literatura.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Simular numericamente o comportamento ao arrancamento de barras de aço embebidas em concreto autoadensável com o auxílio do *software* ANSYS, de forma a validar o modelo numérico com dados de resultados experimentais;
- Resolver a análise numérica aplicando o Modelo de Zonas Coesivas na região de interface do concreto com a barra de aço;
- Analisar numericamente o arrancamento de barras de aço em concreto autoadensável aplicando-se o Modelo de molas.

1.2 Justificativa

O concreto armado é um dos materiais estruturais mais empregados na construção civil. No entanto, o compósito depende fortemente da atuação conjunta das barras de aço e do concreto na reação aos esforços impostos. A propriedade de aderência é a responsável por propiciar esse comportamento unitário aos materiais. Diante disso, fica evidente a importância de pesquisar e compreender a aderência entre os dois elementos, concreto e aço.

Uma solução bastante utilizada para aumentar a aderência aço-concreto, por exemplo, são os concretos autoadensáveis que aumentam a coesão e restringem a segregação dos constituintes, o que beneficia a região da interface entre os materiais. Desse modo, há aumento da resistência de aderência, pois causa um acréscimo na adesão e no atrito da barra de aço com o concreto.

A simulação numérica, pelo método dos elementos finitos, possibilita a elaboração de um modelo geral que, ao alterar os parâmetros de entrada, permite avaliar os corpos de prova sob diferentes condições, em tempo hábil e custo reduzidos, quando comparado aos ensaios experimentais. O Método dos Elementos Finitos (MEF) viabiliza analisar o comportamento das estruturas antes de produzi-las, pois é possível prever o comportamento da estrutura em serviço, ou seja, como

ocorrerá a distribuição das tensões, das deformações e entre outros parâmetros recorrentes.

A modelagem numérica do ensaio de arrancamento apresenta uma grande variedade de parâmetros envolvidos como as propriedades da barra de aço e do concreto, as propriedades geométricas, a malha de elementos finitos e o contato entre os materiais. Estes fatores aumentam a dificuldade de analisar numericamente o mecanismo de aderência, principalmente as propriedades da interface, portanto justificando a pequena quantidade de pesquisas disponíveis e resultados totalmente satisfatórios.

Os benefícios oferecidos pelo MEF associados a escassez de estudos numéricos da aderência foram o que tornaram esta pesquisa necessária, visando colaborar com a obtenção de resultados mais assertivos em pesquisas futuras sobre o mecanismo.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho é composto por cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução (item 1), os objetivos específicos e gerais e a justificativa da pesquisa. O segundo tópico apresenta a revisão da literatura (item 2), inicialmente, trata da conceituação geral para método dos elementos finitos. Na sequência, apresenta informações sobre o *Analysis Systems Incorporated* (ANSYS), mecanismo de aderência, ensaios experimentais e estudos já realizados em mesmo contexto deste trabalho.

O capítulo 3 aborda a metodologia (item 3) utilizada na análise numérica, realizada com auxílio do *software* ANSYS, detalhando os procedimentos realizados ao aplicar o modelo de zonas coesivas e o modelo de molas para simular o contato entre os materiais. O Capítulo 4 apresenta a análise dos resultados utilizando ambos modelos. Por fim, o Capítulo 5 aborda as conclusões extraídas desta pesquisa e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo contempla a revisão bibliográfica, que visa apresentar conceitos gerais sobre Método dos Elementos Finitos, *Analysis Systems Incorporated* (ANSYS) e relação de aderência aço-concreto. Além disso, demonstra algumas pesquisas que simularam numericamente o ensaio de arrancamento.

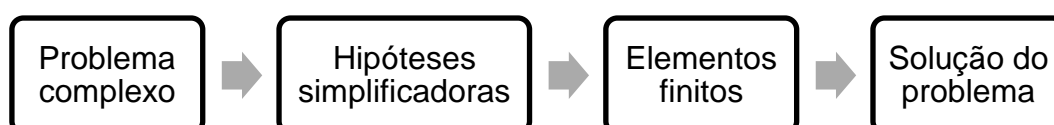
2.1 Método dos elementos finitos

A primeira publicação a usar o termo “elemento finito”, conforme diversos autores, foi escrita por Ray Clough em 1960. O grande desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos (MEF) se deu nas décadas de 60 e 70, que contribuíram para a atual configuração. O avanço do uso do método para projetistas estruturais foi nas décadas de 80 e 90, em virtude da dissipação do uso de computadores e a evolução tecnológica dos aparelhos (AZEVEDO, 2003).

Segundo Reddy (1993), o método dos elementos finitos se baseia em dividir um problema complexo em um grupo de problemas mais simples, chamados de elementos finitos. O conjunto dos elementos finitos são denominados de malhas. Com isso, a solução é estabelecida parcialmente para os elementos do grupo que, quando associadas, tornam-se a solução do problema complexo.

O método é utilizado para análise de meios contínuos, ou seja, em problemas complexos demais para ser analisados de forma exata. Em virtude disso são adotadas hipóteses simplificadoras com a finalidade de produzir o modelo matemático, que é expresso por equações matemáticas e visa se aproximar ao máximo do problema complexo, conforme o fluxograma da Figura 1. Portanto, possibilita o seu uso na análise da maioria dos sistemas físicos da engenharia (SORIANO; LIMA, 2003).

Figura 1 – Fluxograma da solução por MEF.



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com Azevedo (2003), os pré-requisitos para a análise no MEF de uma estrutura são: determinar quais tipos de ações a estrutura está submetida, por

exemplo, dinâmica ou estática; verificar se análise é linear ou não linear, tendo em consideração a geometria e a relação entre tensões e deformações, e classificar o tipo de estrutura, entre reticuladas, laminares ou sólidas.

O método dos elementos finitos pode basear-se no modelo dos deslocamentos, em modelos de equilíbrio, ou em métodos híbridos e mistos. No entanto, o modelo dos deslocamentos é o mais simples e versátil (AZEVEDO, 2003).

O modelo de deslocamentos do método de elementos finitos, baseia-se no princípio dos deslocamentos virtuais no caso de sistema conservativo, permite a determinação de solução em termos de deslocamento nodais. Vale ressaltar que se arbitra o campo de deslocamento de cada elemento, em função dos deslocamentos nodais. Portanto, o equilíbrio infinitesimal do meio contínuo é dividido em equilíbrio de cada elemento finito isolado, com isso ocasionando a troca de equações diferenciais de equilíbrio por equações algébricas de equilíbrio para representar o elemento como um todo, conseqüentemente encontrando as equações de equilíbrio da malha de elementos (SORIANO; LIMA, 2003).

Outra teoria utilizada é a teoria elementar de viga nos modelos reticulados, nesse modelo não são inseridas aproximações adicionais ao modelo matemático no equilíbrio de cada elemento, porque os modelos possuem um número discreto de nós com incógnitas a determinar (SORIANO; LIMA, 2003).

2.1.1 ANSYS

O *Analysis Systems Incorporated* (ANSYS) é um *software* utilizado para a simulação numérica, baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). O ANSYS é um dos programas mais respeitados do mundo nos meios acadêmicos e comerciais. Além disso, a ferramenta é eficiente ao ensino do Método dos Elementos Finitos e na realização de projetos de pesquisa em engenharia civil e mecânica (SILVA et al., 2001).

De acordo com Silva et al. (2001), o sistema computacional do ANSYS é dividido conforme o tipo de análise. Os tipos de análise são: estrutural, térmica, escoamento interno de fluídos, escoamento externo de fluídos e eletromagnética.

ANSYS (1998) apud Marinho (2002), relata que o software apresenta sete maneiras de realizar análise estrutural, conforme segue:

- **Análise estática:** apresenta dois métodos para análises estáticas que podem ser lineares e não lineares, usadas para definir deslocamentos, tensões e entre outros parâmetros. Vale ressaltar que a análise estática não linear permite inserir plasticidade, tensão, rigidez, grandes deformações, grandes tensões, hiperelasticidade, superfície de contato e fissuração.
- **Análise modal:** serve para estudar as frequências naturais e modos de vibração de uma estrutura;
- **Análise harmônica:** utilizada para estruturas submetidas a cargas harmônicas variáveis no tempo;
- **Análise dinâmica transiente:** para estruturas sujeitas as cargas aleatoriamente variáveis no tempo. Possibilita a inclusão de plasticidade, tensão, rigidez, grandes deformações, grandes tensões, hiper elasticidade, superfície de contato e fissuração;
- **Análise espectral:** usada para resolver tensões e deformações em função de um espectro de resposta ou uma contribuição de vibrações aleatórias;
- **Análise de flambagem:** possibilita tanto análise de flambagem linear quanto de flambagem não linear, e ainda proporciona a realização do cálculo das cargas de flambagem e encontrar o modo de flambagem;
- **Análise Dinâmica Explícita:** aplicada para calcular soluções rápidas para cargas dinâmicas, grandes deformações e complexos problemas de contato.

A sequência de processamento da análise estrutural no ANSYS é a seguinte: Preferências (*Preferences*) é a etapa de escolha do tipo de análise, Pré-Processamento (*Preprocessor*), Solução (*Solution*) e Pós-Processamento (*General Postprocessor*) que é a etapa de extração dos resultados (SILVA et al, 2001).

O sistema possui duas interfaces que são o sistema *workbench* e o sistema ANSYS *Parametric Design Language* (APDL). Apesar de o sistema *workbench* ser mais simples e de fácil manuseio, o sistema APDL é mais antigo e permite ao usuário um maior controle sobre as simulações (LAZZARI, 2015).

2.1.1.1 Aplicação do ANSYS

A aplicação do *software* é bastante variada. Pode-se citar, por exemplo, a aplicação em diversos ramos da engenharia civil, conforme pode ser observado nos estudos apresentados a seguir:

Marinho (2002) utilizou o ANSYS 5.4/5.5 – APDL para análise e modelagem de estruturas metálicas de arquivancadas reutilizáveis ou temporárias. O autor tinha como finalidade atingir o dimensionamento ótimo dos elementos da estrutura, quando submetidos a cargas estáticas, baseado nos parâmetros peso e tensão. Ademais, o estudo buscou identificar a segurança da estrutura quando estiver sujeita a solicitações rítmicas intensas e propor uma eficiente disposição dos contraventamentos da estrutura.

Lazzari (2016) realizou a simulação numérica das etapas construtivas de pontes estaiadas com a plataforma ANSYS, versão 14.5. Após validar as sub-rotinas com dezesseis vigas em concreto armado ensaiadas por outros pesquisadores, a autora modelou numericamente a Ponte do Saber, localizada na cidade do Rio de Janeiro, seguindo todas as etapas construtivas e comparando-as com os dados do monitoramento desta ponte, durante a fase de execução.

Costa et al. (2006) realizaram a modelagem numérica do ensaio de resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa com o programa ANSYS, versão 6.1, estabelecendo comparação dos resultados obtidos para corpos de prova de diferentes geometrias e dimensões.

Cunha e Souza Junior (2004) avaliaram estruturalmente as peças de madeira reforçada por fibras de carbono, utilizaram modelos de vigas e placas disponíveis no ANSYS. Ainda convém lembrar que eles fizeram diversas variações na posição e taxa de reforço. Por fim, encontraram um ganho de rigidez da peça em função do reforço aplicado.

Morais (2014) investigou o comportamento estrutural de um edifício de 20 pavimentos misto (aço-concreto) submetido às ações de cargas de vento não determinísticas. Empregou e analisou três tipos de contraventamento no núcleo interno da edificação. A análise foi via método dos elementos finitos com o emprego do ANSYS. Com isso, estabeleceu uma comparação dos resultados obtidos para deslocamentos e acelerações com os valores limites propostos por normas e recomendações de projeto.

Rodrigues e Forti (2015) estudaram numericamente a tensão de aderência entre barra de aço e concreto, com base no ensaio *pull-out test*, utilizando o ANSYS 15.0. Os tipos de elemento empregados foram o SOLID 65 e o SOLID 185 que representaram o concreto e o aço, respectivamente. O contato entre os materiais foi por ligação perfeita, portanto os elementos compartilhavam os nós da malha utilizada.

As autoras estabeleceram comparação com ensaios experimentais disponíveis na literatura, com o intuito de validar o modelo.

2.2 Mecanismo de Aderência

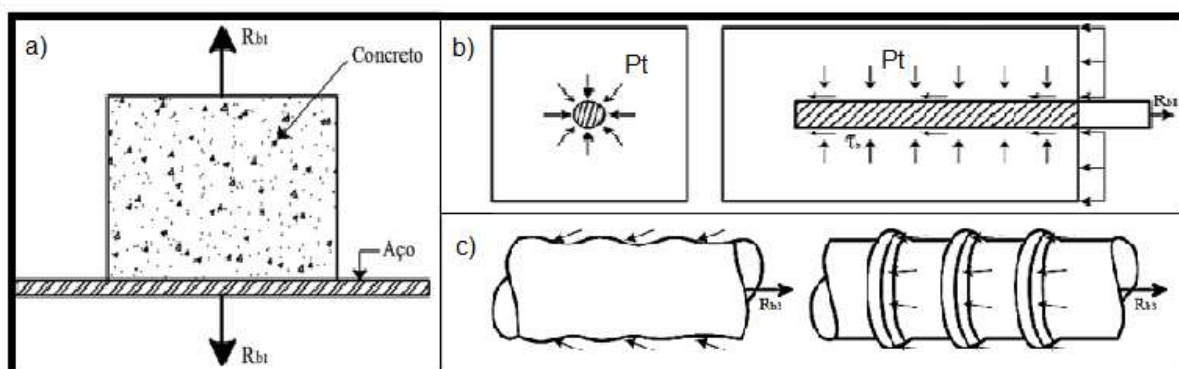
O mecanismo de aderência é extremamente importante em estruturas de concreto armado, em virtude que a absorção dos esforços deve ser pela atuação conjunta das barras de aço e o concreto. Ademais, o fenômeno assegura a transferência de esforços entre o concreto e o aço, bem como a compatibilidade das deformações entre eles, fazendo com que sejam iguais até ser atingida a tensão limite do concreto. Após atingir a tensão de tração máxima do concreto, é o mecanismo de aderência que impede o deslocamento relativo entre o concreto e a armadura (TAVARES, 2012).

Segundo França (2004), a tensão de aderência é a relação entre a força que está atuando na barra e a área da barra que está aderente ao concreto. O comportamento da aderência pode ser influenciado por alguns fatores, por isso estes precisam ser considerados no dimensionamento e análise, como a composição do concreto, idade de carga, resistência mecânica do concreto, diâmetro da barra, posição das barras na concretagem, adensamento e estado superficial das barras.

A eficiência do mecanismo é quantificada através da relação tensão *versus* deslizamento. Deslizamentos pequenos são causados por acomodações da interface ou danos locais, e quando atingem os valores limites estabelecidos em normas ou procedimentos de projeto estrutural, indicam o fim da aderência (CAETANO, 2008).

O mecanismo de aderência pode ser separado em três parcelas, ilustradas na Figura 2, a fim de possibilitar a melhor compreensão do fenômeno. As parcelas são aderência por adesão que é gerada pela ação de colagem entre o aço e o concreto, aderência por atrito causada pela rugosidade da superfície do aço, desde que haja pressões transversais (P_t) na armadura e aderência mecânica devido a criação de “consolos de concretos” nas nervuras das barras, que geram uma resistência ao corte e, conseqüentemente, ao deslizamento (FUSCO; 1995) (LEONHARDT; MONNIG, 2008).

Figura 2 – Parcelas de Aderência: a) aderência por adesão; b) aderência por atrito e c) aderência mecânica.



Fonte: Adaptado de Fusco (1995).

A ruptura por deslizamento da barra e a ruptura por fendilhamento do concreto são os principais tipos de ruptura da aderência entre os materiais. Ainda existe a ruptura que pode anteceder as citadas, chamada de ruptura do aço, apresentado juntamente com as demais rupturas na Figura 3, que ocorre quando é atingida a tensão de escoamento do aço pela tensão atuante na barra de aço (TAVARES, 2012).

Figura 3 – Tipos de ruptura de aderência: ruptura do aço, deslizamento das barras de aço e ruptura por fendilhamento.



Fonte: França (2004).

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

De acordo com Castro (2002), os principais ensaios para determinação da aderência são *pull-out test*, ensaio de arrancamento ASTM C-234, ensaio de arrancamento segundo REHM, ensaio de duplo arrancamento, ensaio de arrancamento modificado, ensaio das quatro barras, ensaio de tração em vigas e ensaio tirante. Os ensaios de aderência se diferem entre si, em relação aos materiais

empregados ao compósito, o processo de cura e produção dos corpos de prova, o equipamento utilizado, a geometria dos elementos de concreto, a quantidade e distribuição das barras embebidas.

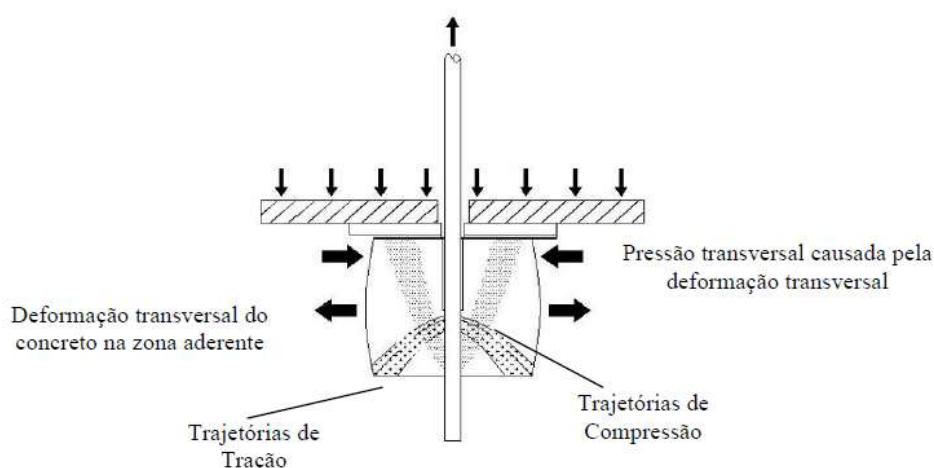
Os ensaios para determinação da resistência de aderência, na grande maioria, são feitos pelo método de arrancamento. Sendo o ensaio de arrancamento mais difundido o *pull-out test*, normalizado pela RILEM-FIP-CEB (1973) (CASTRO, 2002).

O ensaio *pull-out test* é o mais utilizado devido ao seu baixo custo e sua simplicidade e, além disso, ele apresenta de forma clara o comprimento que está aderente ao concreto, sendo este o comprimento de ancoragem (FRANÇA, 2004).

O ensaio consiste em arrancar uma barra de aço posicionada no centro de um prisma de concreto, com aderência em um trecho da barra. As duas extremidades ficam no exterior do prisma, enquanto em um extremo é aplicada a carga de tração, no outro é lido o deslizamento (TOJAL, 2011).

Pode ser observado, na Figura 4, que o concreto no entorno da barra de aço estará sofrendo esforços de compressão. Ademais, a chapa metálica que normalmente é usada para impedir o movimento do concreto, aplica compressão no bloco, conseqüentemente aumentando o confinamento que acarreta uma melhora da aderência (CAETANO, 2008).

Figura 4 – Distribuição de tensões do ensaio de arrancamento.

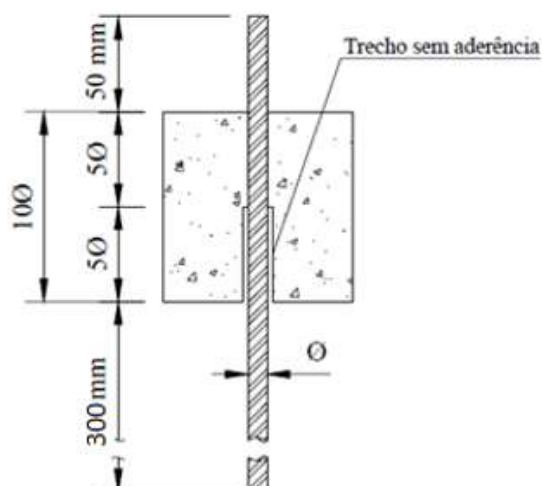


Fonte: Caetano (2008).

A RILEM-FIP-CEB (1973) estabelece as dimensões dos corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 5, para a realização do ensaio. As dimensões do prisma de concreto deve ser 10 vezes o diâmetro da barra que transpassa o elemento. Além disso, deve-se respeitar os comprimentos da barra de aço referente as parcelas

externas ao concreto e a parcela interna com aderência de comprimento 5 vezes o diâmetro da barra.

Figura 5 – Dimensões e considerações para a produção dos corpos de prova, conforme a RILEM-FIP-CEP (1973).



Fonte: Adaptado de Castro (2002).

A velocidade de carregamento deve ser em função do diâmetro da barra e determinada através da Equação 1.

$$V_p = 5 \cdot \Phi^2 \quad (1)$$

A RILEM-FIP-CEB (1973) determina que as forças de tração P obtidas no ensaio sejam transformadas em tensão de aderência e utiliza como referência um concreto de 30 kp/cm^2 de resistência à compressão, conforme a Equação 2.

$$\tau_b = 0,0637 \frac{P}{\Phi^2} \frac{30}{f_{cm}} \quad (2)$$

As unidades de medidas das Equações 1 e 2: V_p [kp/s], Φ [cm], τ_b [kp/cm²], P [kp] e f_{cm} [kp/cm²].

Segundo Almeida Filho (2006), a resistência de aderência depende significativamente da direção da concretagem. Os espécimes concretados na direção vertical, em outras palavras, na mesma direção da barra de aço, apresentam resistências maiores que os concretados na direção horizontal.

2.3 Análise Numérica para Ensaio de Arrancamento

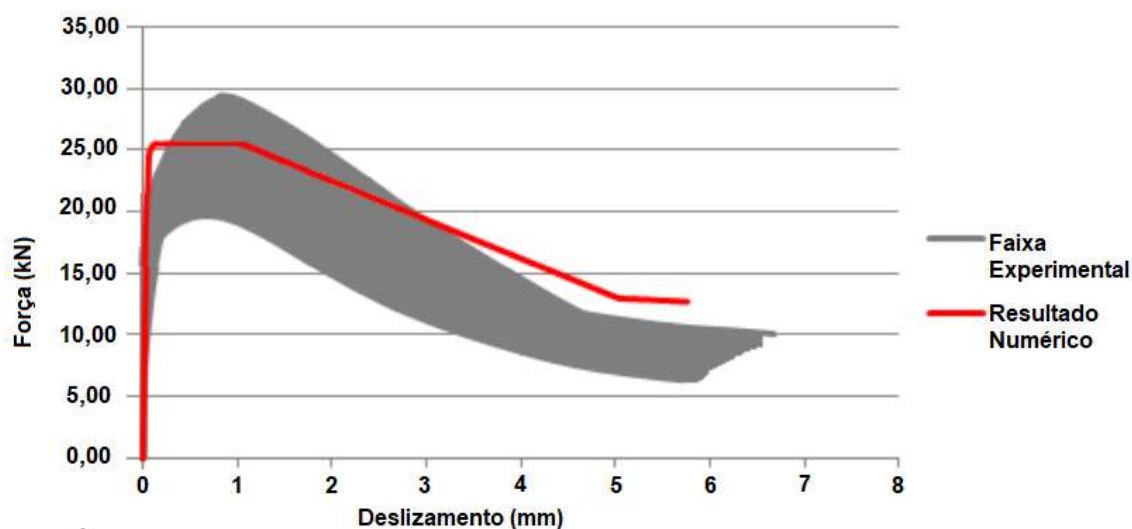
Tavares (2012) realizou uma análise numérica dos resultados experimentais do ensaio *pull-out* encontrados por Vale Silva (2010). O autor utilizou o *software Advanced Tool for Engineering Nonlinear Analysis (ATENA)*, para resolver a parcela numérica pelo Método de Elementos Finitos, que se baseia no modelo de Mohr-Coulomb.

Foram utilizados dois concretos com resistência à compressão distintas T1 e T2, aos 28 dias, de 27,8 MPa e 49,3 MPa, respectivamente. Os espécimes foram cúbicos de 200mm de lado e os diâmetros de barras utilizados foram de 8,0 mm, 10,0mm e 12,5mm. Na análise numérica, os parâmetros da interface de coeficiente de atrito (ϕ) e coesão (c) sofreram variações durante as simulações.

Os resultados da análise numérica ficaram próximos da faixa de resultados experimentais para as barras 8,0mm e 10,0mm do concreto T1, mesmo variando o coeficiente de atrito (ϕ). No entanto, para as barras de 12,5mm, conforme varia o coeficiente de atrito (ϕ), os resultados começam a destoar do experimental. Por isso, decidiu-se por utilizar um coeficiente de atrito de referência de 0,75, com a finalidade da curva de simulação numérica se aproximar mais da experimental.

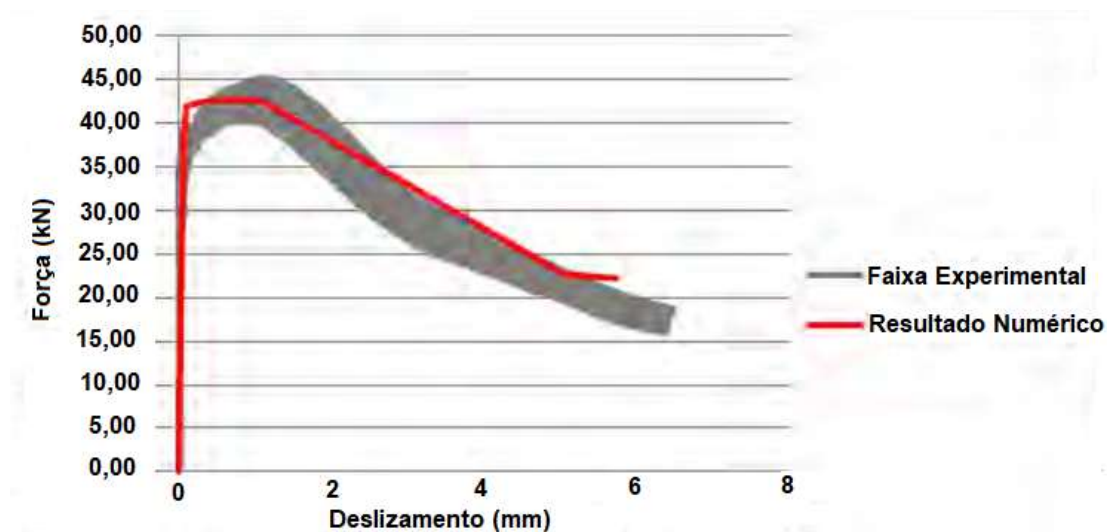
Para o concreto T2, os resultados ficaram dentro da faixa dos dados experimentais até alcançar o valor máximo da tensão de aderência, conforme o apresentado nas Figuras 6 e 7, em que ocorre deslizamento da barra.

Figura 6 - Diagrama força x deslizamento para barra de 8,0mm e concreto de resistência à compressão de 49,3MPa.



Fonte: Adaptado de Tavares (2012).

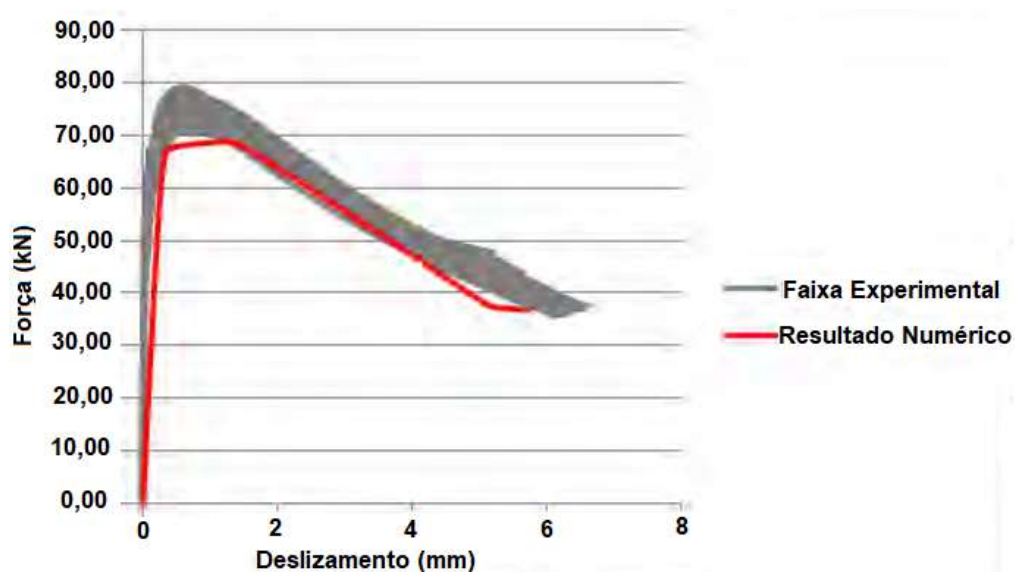
Figura 7 - Diagrama força x deslizamento para barra de 10,0mm e concreto de resistência à compressão de 49,3MPa.



Fonte: Adaptado de Tavares (2012).

Para a barra de 12,5mm o pico da curva ficou abaixo, portanto, o valor da tensão última de aderência é menor no numérico em comparação ao experimental, na Figura 8. Ainda convém lembrar que o autor estabelece os parâmetros como coeficiente de atrito (ϕ) igual a 0,75 e coesão (c) igual a 16MPa para o T1 e 24MPa para o T2.

Figura 8 - Diagrama força x deslizamento para barra de 12,5mm e concreto de resistência à compressão de 49,3MPa.



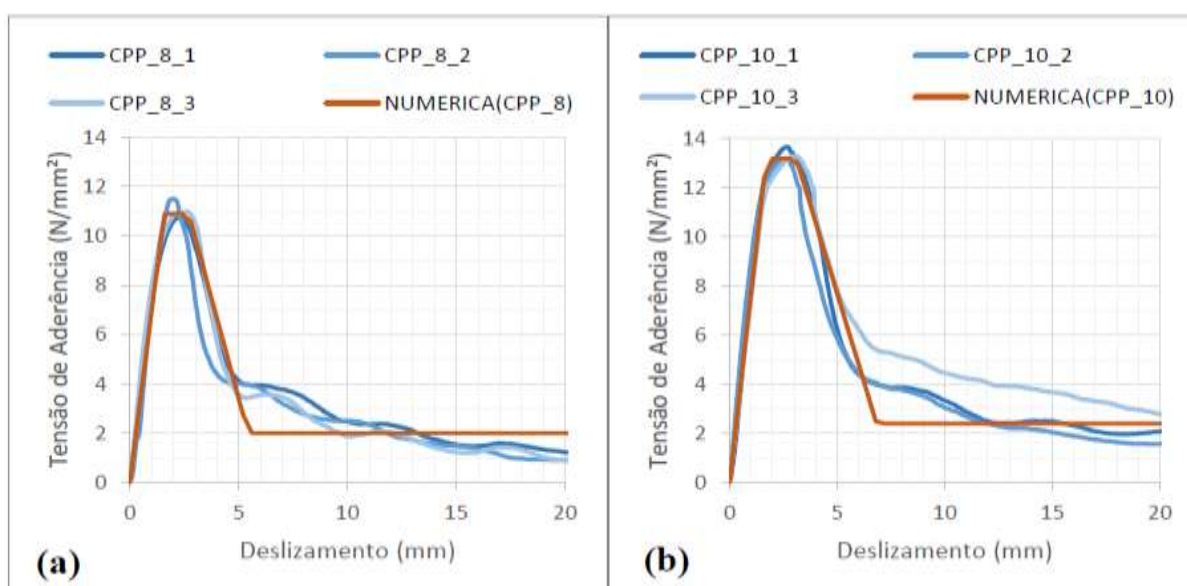
Fonte: Adaptado de Tavares (2012).

Rosales (2016) estudou o fenômeno da aderência com o objetivo de validar os seus estudos experimentais utilizando os modelos numéricos. O autor utilizou corpos de prova cúbicos de 200mm de lado e barras de 8,0mm, 10mm e 12mm de diâmetro. O concreto identificado como A foi o empregado nos prismas de concreto, ele apresentou resistência a compressão média de 34,01 MPa, módulo de elasticidade médio de 25,11GPa e resistência a tração média do concreto de 3,16MPa, dados extraídos de ensaios específicos para determinação das propriedades.

Para a simulação numérica foi usado a biblioteca FemLab, que se baseia no Método dos Elementos Finitos e o *software* Paraview serviu para visualização dos resultados. O comportamento das tensões encontrados na investigação experimental e numérica foram bastante semelhantes, conforme a Figura 9. Ademais, os valores de tensão máxima de aderência dos modelos numéricos ficaram com uma diferença menor que 5% dos valores obtidos por meio da investigação experimental.

O autor também percebeu que antes da ruptura da aderência, as tensões são mais elevadas nos pontos mais próximos a aplicação da carga, devido ao deslizamento da barra. Após o pico da curva, os elementos de contato mais próximos ao ponto de aplicação da carga não suportam as tensões, devido ao movimento da barra, com isso passando as tensões para elementos menos solicitados a fim de manter o equilíbrio da estrutura durante o arrancamento.

Figura 9 – Gráficos com as curvas de tensão versus deslizamento para elementos cúbicos de concreto. (a) Com barra de diâmetro de 8mm. (b) Com barra de diâmetro de 10mm.



Rosales (2016) realizou também o ensaio de arrancamento em corpos de prova cilíndricos para identificar se há diferença nos resultados, porque alguns autores preferem trabalhar com espécimes cilíndricos, outros preferem prismáticos. Os corpos de prova cilíndricos apresentaram valores para tensões máximas de aderência cerca de 5 a 10% maiores que os prismáticos e o deslizamento no momento da ruptura da aderência entre 20 e 25% maiores. O autor ainda destaca que o aumento do cobrimento de concreto, eleva a tensão máxima de aderência.

Sena-Cruz et al. (2009) comparou aço galvanizado e aço convencional em relação aos ensaios de *pull-out*. Separou em três grupos que são: barras convencionais, barras de aço galvanizado e barras de aço galvanizado com revestimento epóxi. O aço usado foi o A500NR com 20 mm de diâmetro, de acordo com as normas portuguesas. Os espécimes foram cúbicos de 200mm de lado.

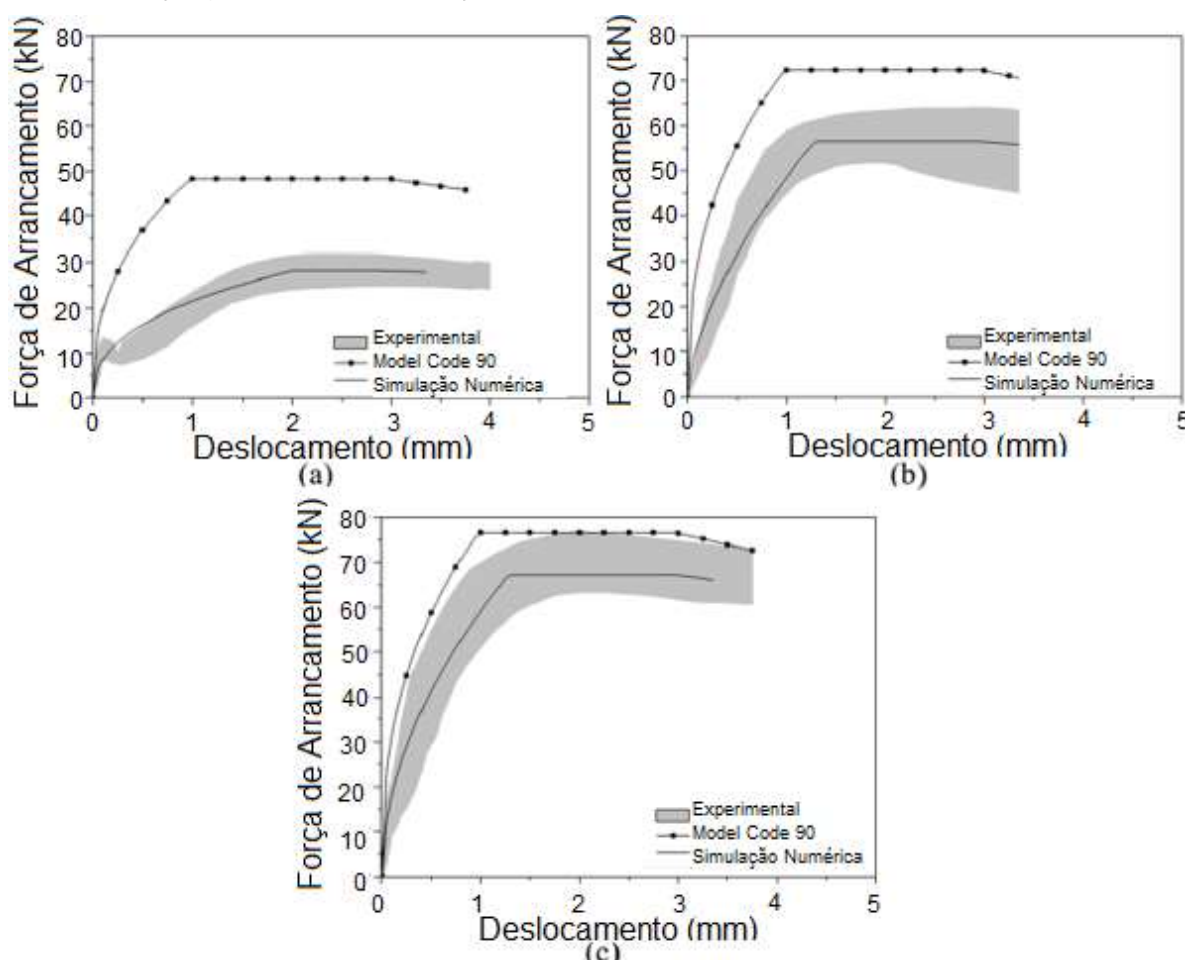
Os ensaios de compressão foram realizados para as idades do concreto de 3, 7 e 28 dias e apresentaram resistência à compressão média de 23,8 MPa, 28,7MPa e 37,8MPa, respectivamente.

Os aços convencional e galvanizado apresentaram comportamento similar em relação à força de arrancamento *versus* deslocamento com concreto de 3 dias, porém os revestidos com epóxi apresentaram uma força máxima de arrancamento, cerca de 40% menor. Para os concretos de 7 dias, as barras galvanizadas e galvanizadas com epóxi apresentaram, respectivamente, a força máxima de arrancamento média 25% e 55% menor que os convencionais. No concreto com 28 dias de cura, as barras galvanizadas com e sem epóxi apresentaram uma força de 15% e 42% menor que os convencionais, respectivamente.

Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os encontrados a partir de investigação numérica, como mostra a Figura 10. A diferença entre curvas de força de arrancamento *versus* deslocamento obtidas pelos métodos experimentais e numéricos foram pequenas. Além dos dados encontrados pelos autores, foi utilizado para comparação o modelo de tensão de aderência-escorregamento propostos pelo *Model Code* (MC) 1990.

Os autores concluíram que os resultados propostos pelo MC CEB-FIP de 1990 não foram precisos, principalmente a força máxima que foi superestimada nas barras galvanizadas com epóxi, em contra partida se ajustar alguns parâmetros o modelo pode ser usado com precisão para simular os ensaios experimentais.

Figura 10 – Curvas de força *versus* deslizamento para dados encontrados por Sena-Cruz et al. (2009) e CEB-FIP *Model Code-90* aos 28 dias. (a) Aço galvanizado + epóxi. (b) Aço galvanizado. (c) Aço convencional.



Fonte: Adaptado de Sena-Cruz et al. (2009).

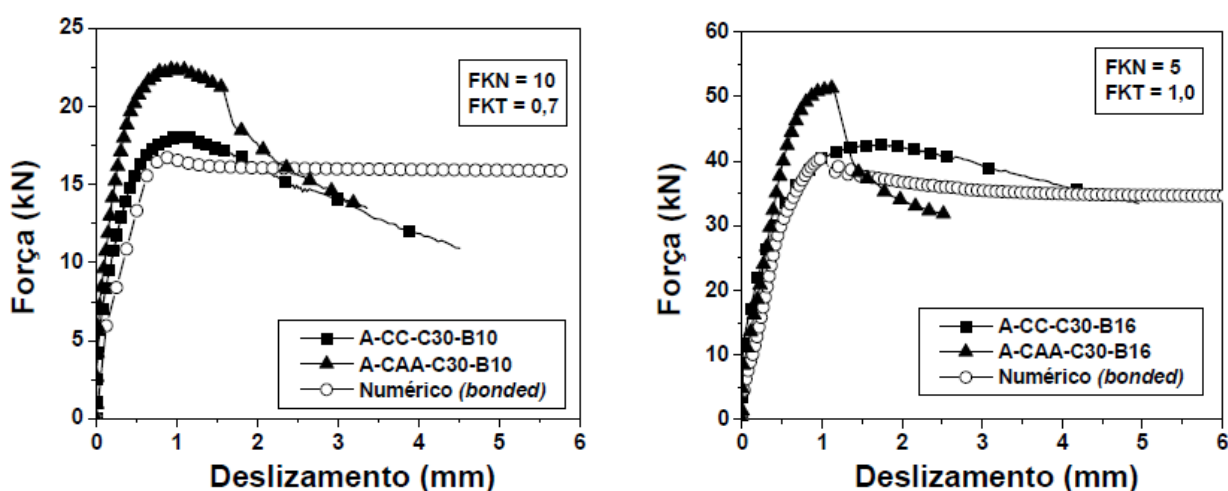
Almeida Filho (2006) estudou a aderência entre barras de aço e concretos com traços convencionais e autoadensáveis. Os concretos apresentavam resistência à compressão de 30MPa e 60MPa e as barras de aço possuíam diâmetro de 10, 12,5 e 16mm. Os elementos de concreto foram cilíndricos com diâmetro de 10 vezes a bitola da barra. Vale ressaltar que a grande maioria dos espécimes de 30MPa romperam por arrancamento da barra de aço, porém alguns com barra de 16mm apresentaram ruptura por fendilhamento do concreto. Em contra partida, nos de 60MPa a ruptura foi por fendilhamento do concreto em todos os corpos de prova, devido à alta resistência à compressão do compósito.

O autor utilizou o software ANSYS para a simulação numérica, os elementos utilizados foram SOLID 65, SOLID 45, TARGE 170 e CONTA 174, que representaram o concreto, o aço, o contato entre os materiais e as superfícies associadas com elemento de contato, respectivamente. A análise foi realizada para os espécimes com

barras de 10 e 16mm e com concreto convencional (CC) e concreto autoadensável (CAA).

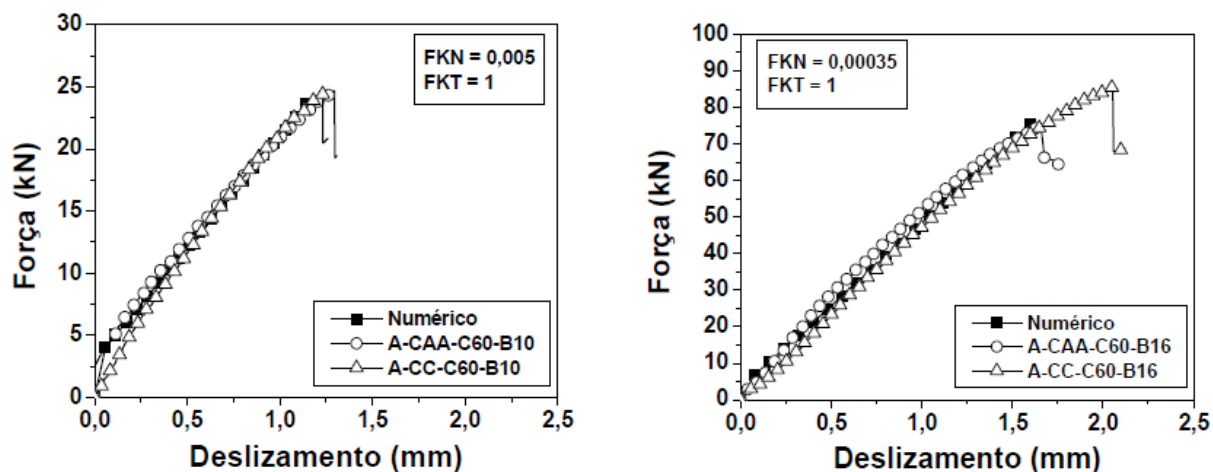
Após simulação, foi realizada comparações entre os resultados experimentais e numéricos para concretos de resistência à compressão de 30MPa, conforme a Figura 11, e de 60 MPa, como visto na Figura 12.

Figura 11 – Gráficos de comparação dos resultados, a partir de curvas de força *versus* deslizamento, para concreto da classe C30 e barras de 10mm e 16mm, respectivamente.



Fonte: Almeida Filho (2006).

Figura 12 – Gráficos de comparação dos resultados, a partir de curvas de força *versus* deslizamento, para concreto da classe C60 e barras de 10mm e 16mm, respectivamente.



Fonte: Almeida Filho (2006).

Os resultados numéricos foram bem próximos dos resultados experimentais com uma diferença de 5% para os corpos de prova com barras de 10mm e 14% para os de 16mm para os concretos da classe C60, e a comparação para CC com resistência à compressão de 30MPa apresentaram uma diferença de 8%. Todavia, nos concretos autoadensáveis da classe C30 os resultados apresentaram uma diferença expressiva de 35%.

Segundo Almeida Filho (2006), o modelo é adequado para estimar a força de arrancamento e o deslizamento em concretos convencionais, contudo no caso de CAA, o modelo subestima a força de arrancamento. Dessa forma, o autor salienta a necessidade de maiores investigações em concretos autoadensáveis, a fim de representar melhor o comportamento do fenômeno.

A existência do concreto armado está diretamente relacionada ao mecanismo de aderência, portanto é de suma importância estudá-lo. Por isso, encontra-se na literatura diversas análises experimentais, no entanto as análises numéricas são apresentadas em menor quantidade. Vale ainda ressaltar que algumas análises numéricas conseguiram obter uma excelente aproximação com os dados experimentais encontrados a partir do ensaio *pull-out test*.

Todavia, ainda existe necessidade de mais investigações numéricas em relação ao fenômeno da aderência. Exemplo disso é o fato de o autor, Almeida Filho (2006), ter destacado em sua pesquisa a importância de maiores estudos numéricos no que diz respeito ao concreto autoadensável por ele desenvolvido.

3 METODOLOGIA

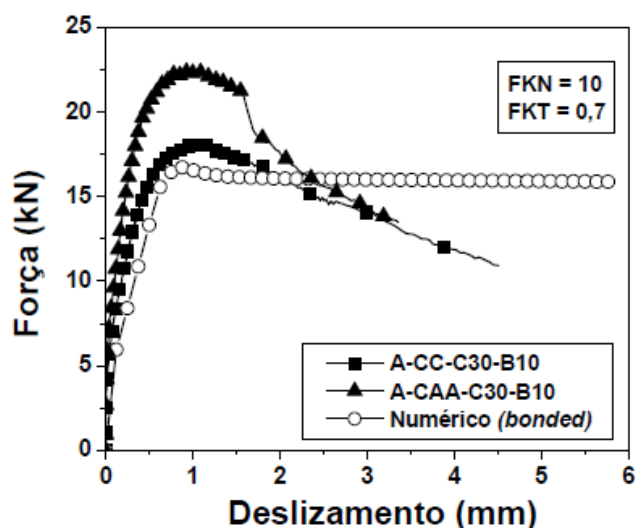
Neste capítulo será detalhada as etapas que compõem o desenvolvimento desta pesquisa. Os dados experimentais foram extraídos da pesquisa de Almeida Filho (2006). Inicialmente, realizou-se uma abordagem dos resultados obtidos pelo autor, a composição do concreto utilizado e algumas de suas propriedades, bem como a configuração dos espécimes.

Na sequência são apresentados os modelos que foram utilizados para a solução da análise numérica, por meio do programa ANSYS, que se baseia no Método dos Elementos Finitos. Os modelos aplicados para resolução do problema foram: Modelo de contato + Material de Zonas Coesivas e o Modelo de molas. Portanto, será apresentado uma breve explicação dos modelos e algumas considerações que foram adotadas durante a investigação numérica.

3.1 Dados experimentais

Almeida Filho (2006) destacou a necessidade de uma maior investigação numérica, com base em seus dados experimentais, nos casos que foram utilizados concretos autoadensáveis. Através do modelo numérico desenvolvido, o autor encontrou resultados que subestimaram a força de arrancamento, quando comparados as forças obtidas experimentalmente. Então, os resultados da análise numérica são muito conservadores e não apresentam a real força de arrancamento que os espécimes suportariam. Esta consideração pode ser visualizada na Figura 13.

Figura 13 – Resultados experimentais e numéricos para espécimes com concreto autoadensável de classe de resistência à compressão de 30MPa e barra de 10mm.



Fonte: Almeida Filho (2006).

O comportamento da análise numérica apresentada no gráfico da Figura 13 será estudado nesta pesquisa. Em suma, foram aplicados modelos e considerações diferentes aos adotados por Almeida Filho (2006), a fim de contribuir com uma melhor aproximação dos resultados numéricos aos experimentais utilizando o concreto autoadensável.

3.1.1 Composição e propriedades mecânicas

A composição empregada para a produção do concreto autoadensável está apresentada na Tabela 1. Convém lembrar que foram analisadas as propriedades de habilidade de passagem, coesão e fluidez da mistura, por Almeida Filho (2006), aplicando os ensaios da caixa L e de espalhamento. Os resultados dos ensaios reológicos foram satisfatórios segundo o autor.

Tabela 1 – Composição da mistura.

| Material | Quant. (kg) |
|---------------------------|--------------------|
| Cimento | 338,8 |
| Água | 273,6 |
| Filler | 101,6 |
| Areia | 854,8 |
| Brita | 919,1 |
| Superplastificante | 0,4% |

Fonte: Adaptado de Almeida Filho (2006).

A composição foi utilizada para a produção de 9 corpos de prova com dimensões de 10x20cm destinados para ensaios à compressão, à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade longitudinal. Além disso, mais 10 espécimes foram produzidos para o ensaio de arrancamento, aplicando-se barras de 10mm no centro das seções transversais circulares na metade dos espécimes.

Os ensaios foram realizados aos 7 dias e os resultados de resistência à compressão ($f_{c,7}$), módulo de elasticidade longitudinal ($E_{c,7}$) e resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$), para o concreto autoadensável estudado neste trabalho, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades da mistura aos 7 dias.

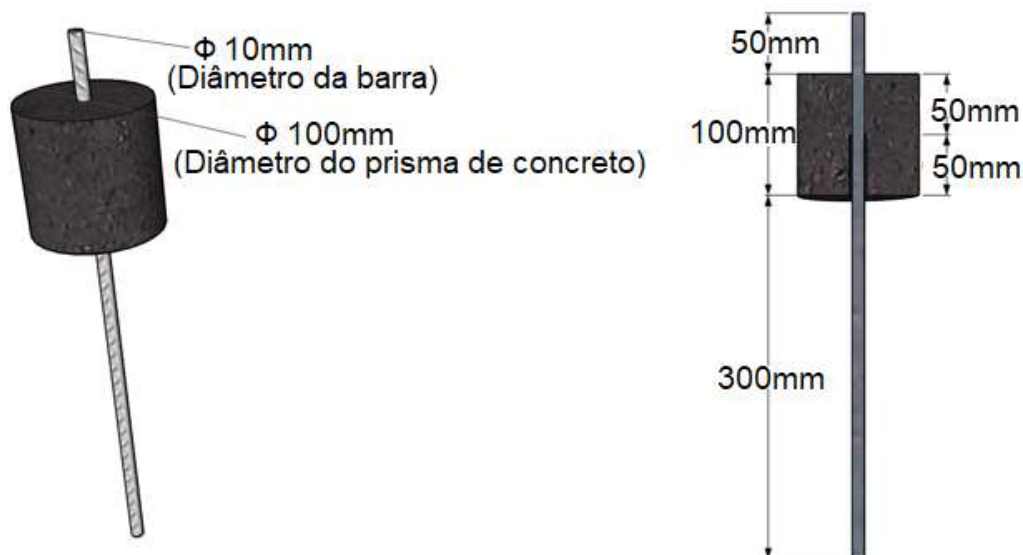
| | Média (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | Coefficiente de Variação (%) |
|---------------|-------------|---------------------|------------------------------|
| fc,7 | 30,10 | 1,297 | 4,31 |
| Ec,7 | 27.873 | 775,40 | 2,78 |
| fct,sp | 2,45 | 0,61 | 24,88 |

Fonte: Almeida Filho (2006).

3.1.2 Corpos de prova

Foram produzidos e ensaiados 5 corpos de prova, conforme as especificações da RILEM-FIP-CEB (1973). Esses corpos de prova foram destinados ao ensaio de arrancamento, com barras 10 mm embebidas no centro da seção transversal. Na Figura 14 é apresentada a configuração dos espécimes.

Figura 14 – Espécimes para *pull-out test*.



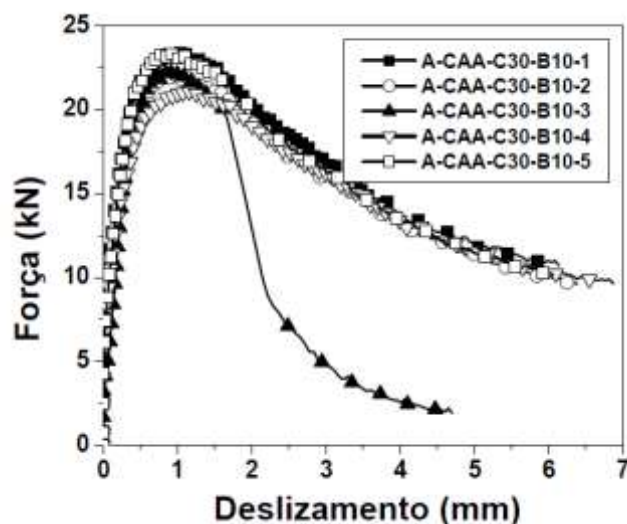
Fonte: Elaboração própria.

3.1.3 Ensaio de Arrancamento

A velocidade de carregamento dos ensaios de arrancamento foi de acordo com o diâmetro da barra, ou seja, foi utilizada velocidade de 0,05mm/s para espécimes

com barras de 10mm. O comportamento dos ensaios para os 5 espécimes está apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Curvas experimentais de força *versus* deslizamento para o ensaio de arrancamento.



Fonte: Almeida Filho (2006).

3.2 Análise Numérica

A análise numérica foi realizada com o software *Analysis Systems Incorporated* (ANSYS), versão 11.0, e a interface escolhida foi a *ANSYS Parametric Design Language* (APDL), em virtude de possibilitar um maior controle das simulações pelo usuário.

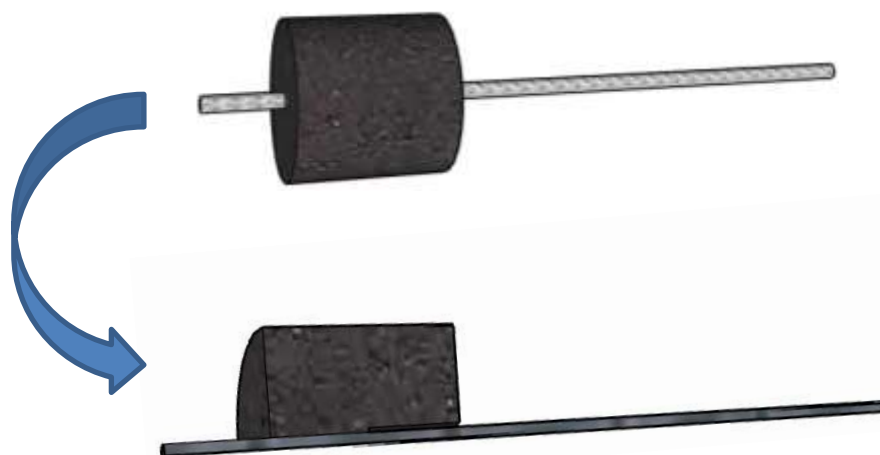
Nesta pesquisa foram utilizadas duas abordagens diferentes para simular o problema de arrancamento (*pullout test*). O primeiro, consiste em um modelo tridimensional, com a interface entre a matriz de concreto e a barra de aço, utilizando elementos de contato e o material de zonas coesivas. O segundo, é um modelo 2D, criado a partir da analogia existente do problema da retirada de barra da matriz e da retirada de fibras. A fim de utilizar como referência uma análise numérica que empregou o modelo para simular o arrancamento de fibras embebidas em matriz cimentícia. Neste último caso, a interface entre os materiais é representada por elementos de molas e o atrito da interface pode ser simulado de diferentes formas. A seguir cada um dos modelos é apresentado em detalhes.

3.2.1 Modelo de contato + Material de Zonas Coesivas

3.2.1.1 Modelo 3D

A geometria do espécime, utilizado no ensaio de arrancamento, sofreu uma redução durante a modelagem no ANSYS, com o objetivo de diminuir a complexidade do problema, ou seja, reduzir o número de elementos da malha, com isso facilitando a solução e exigindo menos tempo de processamento do computador. Diante disso, foi utilizado 1/4 do modelo para representação do espécime, a simplificação está ilustrada na Figura 16. Convém lembrar que esta simplificação não altera em nada o resultado final, pois o *software* apresenta uma ferramenta que aplica simetria nas faces, sem a necessidade de modelar o volume por completo.

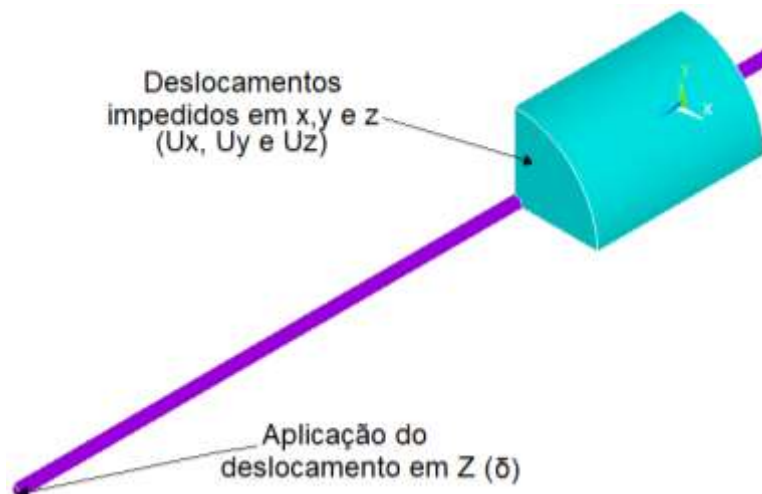
Figura 16 – Simplificação do modelo 3D.



Fonte: Elaboração própria.

As restrições de deslocamento foram aplicadas na superfície do elemento que representa o prisma de concreto, conforme a Figura 17. Ademais, na superfície da extremidade, na qual é aplicado o carregamento nos ensaios experimentais, foi aplicado o deslocamento que variou durante a inserção dos parâmetros nas simulações numéricas. A partir das reações calculadas na superfície restrita, pelo ANSYS, é possível então plotar o gráfico Força x Deslizamento do modo numérico (Figura 15).

Figura 17 – Locais de aplicação do deslocamento e restrições no ANSYS.



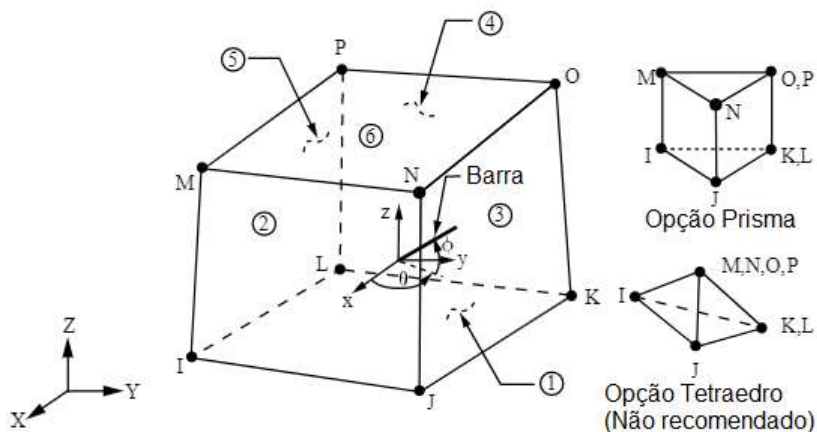
Fonte: Elaboração própria.

3.2.1.2 Tipos de elementos e comportamento dos materiais

A escolha dos tipos de elementos empregados ao concreto e ao aço foi baseada na pesquisa de Almeida Filho (2006).

O tipo de elemento SOLID65 foi aplicado ao concreto. De acordo com o ANSYS (2007), o sólido pode falhar quando submetido à tração e esmagar à compressão. O elemento é definido por oito nós, conforme é apresentado na Figura 18, com três graus de liberdade em cada nó, em outras palavras, translações nas direções nodais x, y e z.

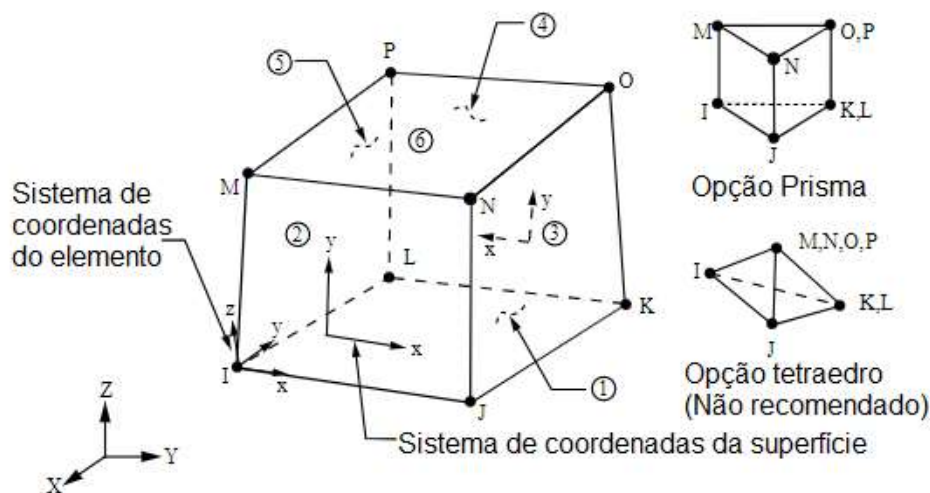
Figura 18 – SOLID65.



Fonte: Adaptado de ANSYS (2007).

O tipo de elemento SOLID45 foi aplicado a barra de aço. Segundo ANSYS (2007), o sólido é definido por oito nós, como pode ser visto na Figura 19, e três graus de liberdade em cada nó: translações em x, y e z. O elemento apresenta capacidades de plasticidade, endurecimento por tensão, grande deformação, fluência, entre outras.

Figura 19 – SOLID45.



Fonte: Adaptado de ANSYS (2007).

Os elementos de contato destinados a representar a superfície entre concreto e barra de aço foram embasados nos utilizados por Friedrich (2016). De acordo com ANSYS (2007), o elemento de contato, CONTA 174, representa a superfície de menor rigidez e o TARGE170 a superfície de maior rigidez, ou seja, superfície da barra de aço.

Os tipos de elementos utilizados, neste trabalho, e o local de aplicação estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Tipos de elementos

| Tipo de elemento | Aplicação |
|------------------|-------------------------|
| SOLID65 | Concreto |
| SOLID45 | Aço |
| TARGE170 | Contato (Maior rigidez) |
| CONTA174 | Contato (Menor rigidez) |

Fonte: Elaboração própria.

Embora o elemento SOLID65 possa simular bem o comportamento do concreto, falhar em tração e esmagar em compressão, neste trabalho o concreto e a barra foram considerados lineares elásticos e isotrópicos, pois não foi obtida uma convergência para a solução incluindo as reais capacidades dos materiais. O problema tornou-se altamente não linear, devido ao material (concreto) e a presença de contato entre os materiais que também apresentam um comportamento não linear. Dessa forma, este procura ser um trabalho inicial apontando a capacidade do programa e dos modelos desenvolvidos, porém com melhoras a serem implementadas em trabalhos futuros.

Os módulos de elasticidade e os coeficientes de Poisson aplicados, no ANSYS, ao concreto e ao aço são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades dos materiais no ANSYS

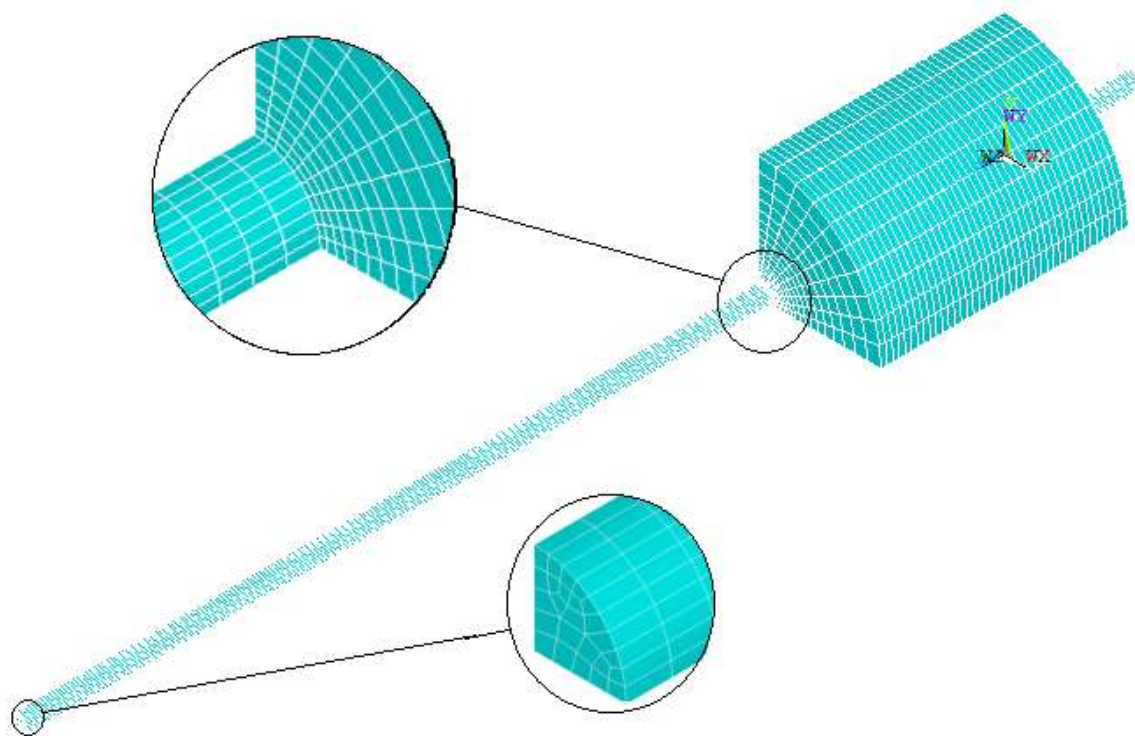
| | Módulo de Elasticidade (GPa) | Coefficiente de Poisson |
|---------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Concreto | 27,87 | 0,15 |
| Barra de Aço | 210 | 0,3 |

Fonte: Elaboração própria.

3.2.1.3 Malha

A malha é formada por elementos hexaédricos, as dimensões e quantidade de elementos foram determinadas a partir de um estudo de convergência de malha. O critério de parada para refino foi a simples convergência da solução. Isso porque se a malha era muito “grosseira”, o contato entre as superfícies não era devidamente definido, e não se tinha uma solução. Por outro lado, a malha não poderia ser muito pequena devido ao limite da capacidade do computador utilizado (processador Intel Core i7, 2 TB de RAM e 8 GB de memória). Por isso, adotou-se a malha apresentada na Figura 20, que apresentou uma análise satisfatória a partir dos limitantes mencionados acima.

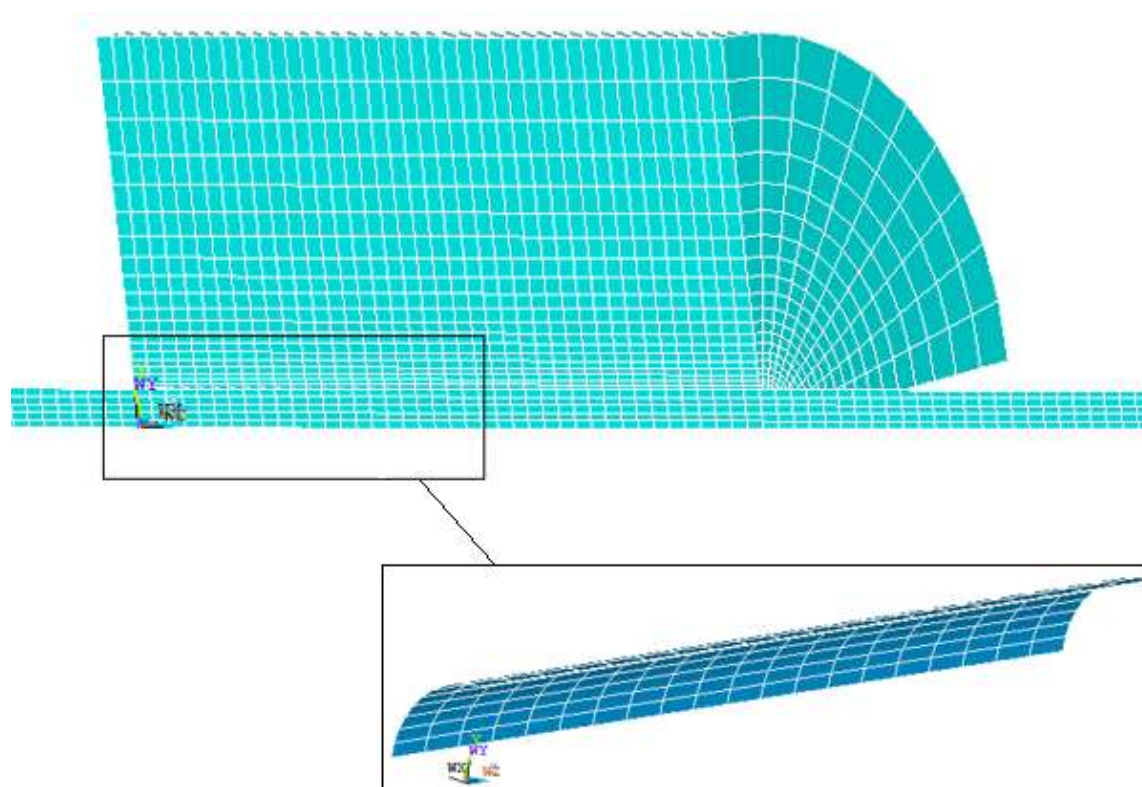
Figura 20 – Malha de elementos finitos.



Fonte: Elaboração própria.

O prisma cilíndrico de concreto possui 8.000 elementos e 6.699 nós. A barra de aço tem 4.500 elementos e 2.832 nós. O modelo por completo totaliza 12.500 elementos finitos com formato de hexaedros e 9.531 nós. A superfície de contato compreende a metade do comprimento do prisma cilíndrico, conforme as recomendações propostas pela RILEM-FIP-CEB (1973). A região de interface modelada no programa, apresentada na Figura 21, possui 231 nós. As áreas de contato tanto da barra de aço quanto do concreto precisam ter o mesmo número de nós.

Figura 21 – Superfície de contato entre concreto e barra de aço.



Fonte: Elaboração própria.

3.2.1.4 Material de Zonas Coesivas

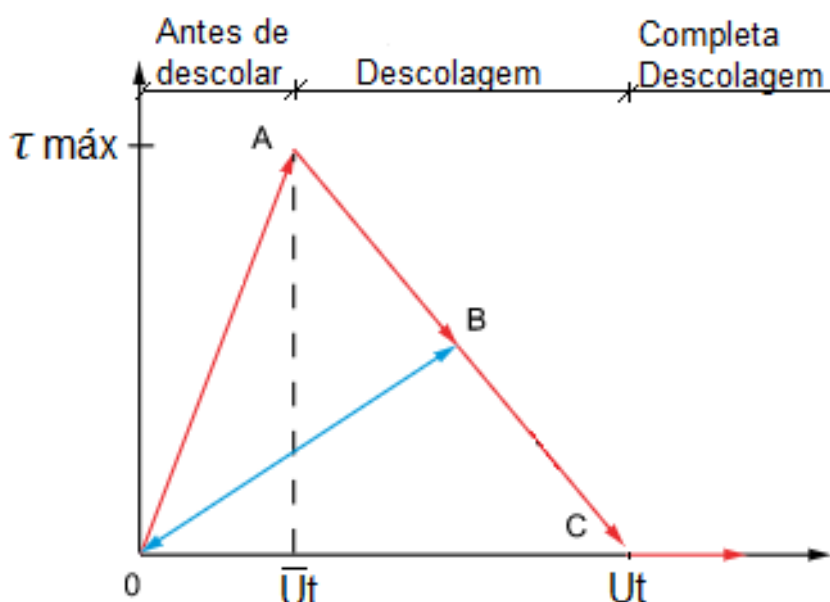
Segundo Friedrich (2016), as superfícies de contato podem ser separadas de duas maneiras ao modelar no *software*, sendo elas, a partir da aplicação de elementos de interface e o material de zonas coesivas (*cohesive zone material* - CZM) ou elementos de contato e o CZM como material, a qual o autor empregou em sua pesquisa e utilizou-se neste trabalho. Além disso, o modelo utilizado como material é o material de zonas coesivas bi linear, a fim de melhor representar o comportamento da interface ao arrancamento.

O modelo de zonas coesivas são técnicas que servem para introduzir uma energia de fratura crítica que também é a energia necessária para separar as superfícies da interface. O modelo de zonas coesivas bi linear utilizando elementos de contato apresenta três modos de descolagem da superfície, o modo I que é a partir da tensão normal aplicada na interface, o modo II que é a partir do deslizamento tangencial, ou seja, cisalhamento das interfaces e modo misto que depende das

componentes normal e tangencial (ANSYS, 2007). Foi considerado nesta pesquisa o modo II de descolagem que é em função da tensão de cisalhamento.

O comportamento bi linear do material de zona coesiva é elástico linear no trecho OA, apresentado na Figura 22, e no ponto A é a tensão máxima de cisalhamento suportada. Portanto, a descolagem começa no ponto A e é concluída no ponto C, o trecho AC é determinado como amolecimento linear. A área sob a curva OAC é a energia liberada devido ao descolamento, também chamada de energia crítica de fratura tangencial. A inclinação AO determina se a fratura é frágil ou dúctil (ANSYS, 2007).

Figura 22 – Material de Zonas Coesivas Bi linear.



Fonte: Adaptado de ANSYS (2007).

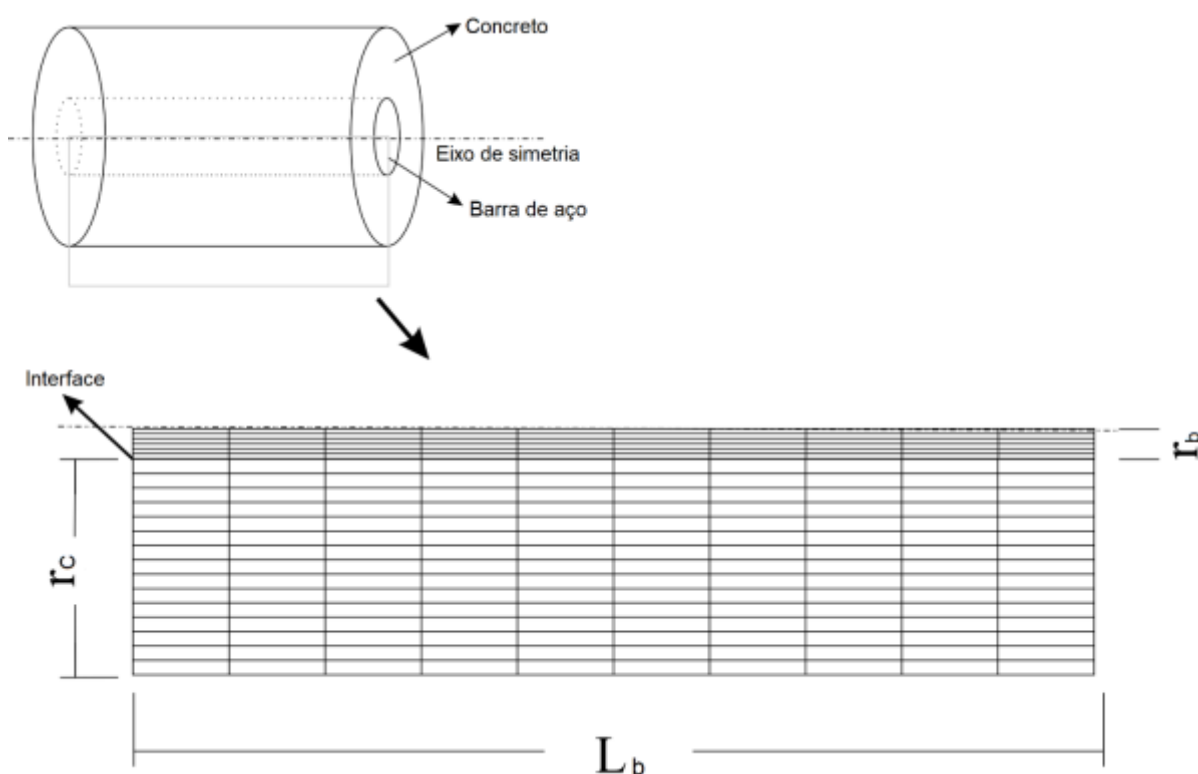
Para simular o processo de arrancamento os parâmetros inseridos no ANSYS devem ser o $\tau_{\text{máx}}$, que representa a tensão de cisalhamento máxima e U_t que é o deslizamento necessário para a completa descolagem da interface de contato entre concreto e a barra de aço. A influência desses dois parâmetros na resposta do modelo também será analisada. Os demais parâmetros apresentados na lei, Figura 22, são definidos pelo programa.

3.2.2 Modelo de molas

A aplicação do modelo de molas foi análoga ao utilizado por Friedrich e Wang (2016). Os autores aplicaram o modelo de molas para análise do arrancamento de fibras embebidas em matriz de cimento, e neste trabalho o modelo foi usado para análise numérica do arrancamento de barras de aço.

O modelo de molas serve para analisar o contato entre os materiais. A análise é realizada em um plano de corte, como pode ser visto na Figura 23. Portanto, o modelo geométrico apresenta duas dimensões, em outros termos os elementos são representados por áreas, e apresentam as dimensões da região de interface aço/concreto. As áreas são definidas pelo comprimento da região de contato e o raio dos materiais.

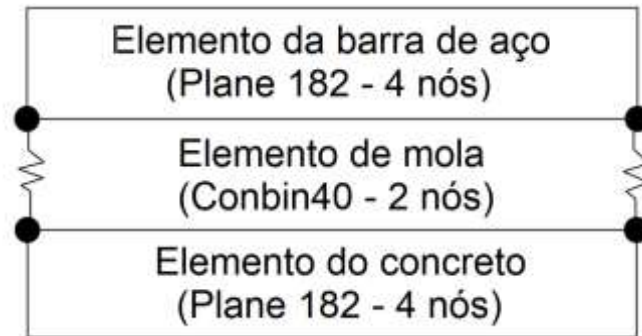
Figura 23 – Modelo geométrico aplicando modelo de molas.



Fonte: Adaptado de Friedrich e Wang (2016).

Na região de interface entre os materiais são aplicados elementos de molas, como é exemplificado na Figura 24.

Figura 24 – Região de interface com elementos de mola não lineares.



Fonte: Adaptado de Friedrich e Wang (2016).

Para Marshall, Cox e Evans (1985), Gopalaratnam e Shah (1987) e Li (1992) a equação do cisalhamento na região de contato é determinada pela Equação 3, ao considerar cisalhamento constante obtém-se a Equação 4. Portanto, encontra-se a rigidez inicial da mola (k_i) com deslocamento ($s=0$). Sendo, $P_{máx}$ a carga máxima de arrancamento antes que seja completo o processo de descolagem, d o diâmetro da fibra ou barra de aço e L_e o comprimento embutido.

$$\pi d \tau = \frac{P_{máx}}{L_e} \quad (3)$$

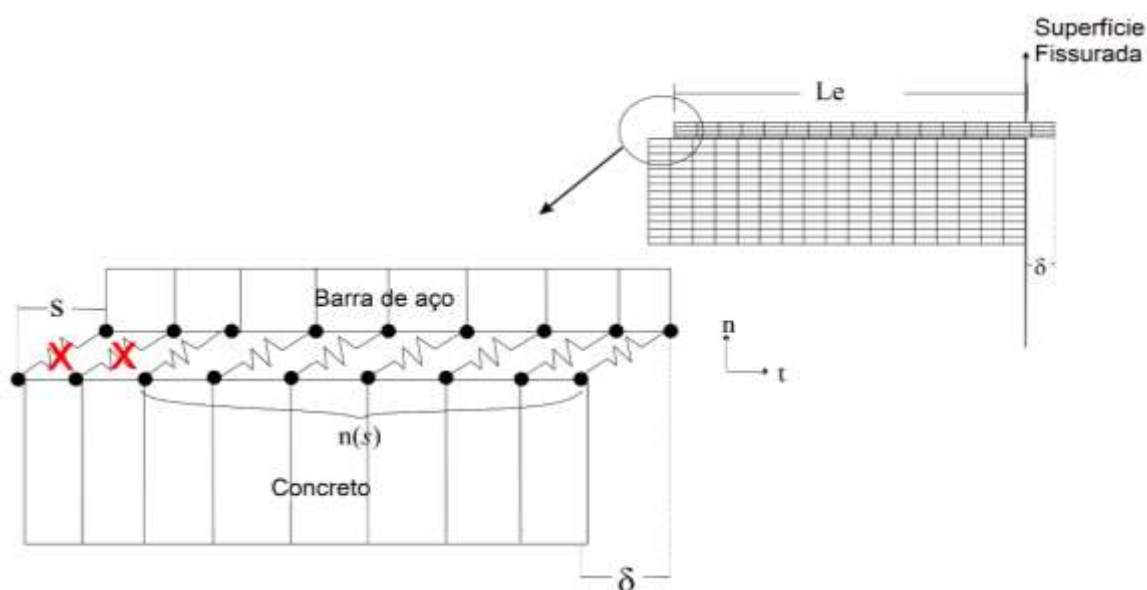
$$k_i = \pi d \tau = \frac{P_{máx}}{L_e} \quad (4)$$

Para $s > 0$, a rigidez da mola é determinada pela Equação 5.

$$k(s) = \frac{k_i (L_b - s)}{n(s) s} \quad (5)$$

O $n(s)$ é o número de molas efetiva. Ao deslocar uma superfície em relação a outra as molas vão chegando ao seu limite de deformação, com isso encerrando a sua funcionalidade, mecanismo visualizado na Figura 25. Portanto, as molas efetivas são as que ainda possuem funcionalidade.

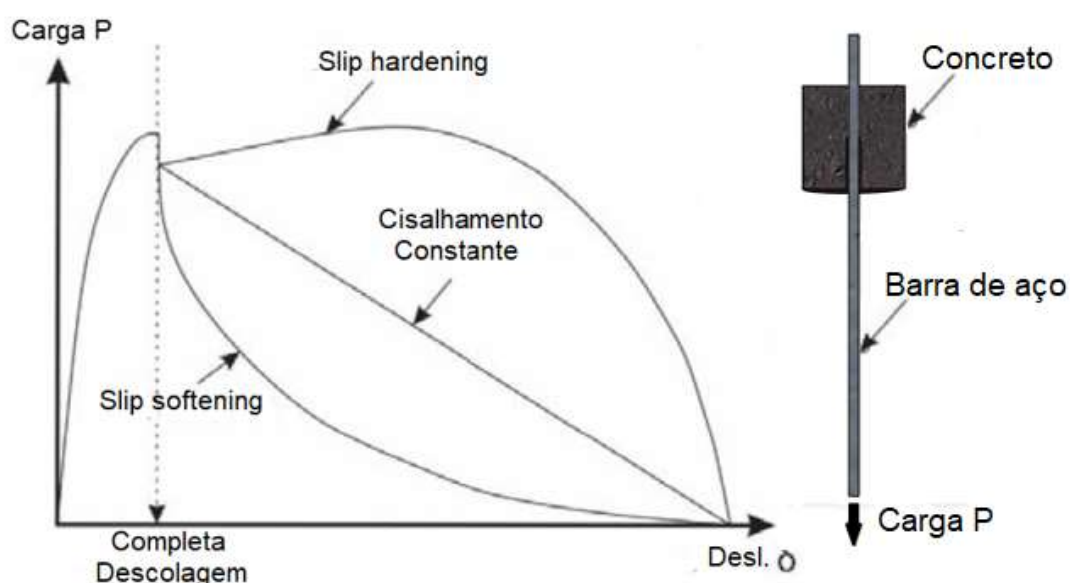
Figura 25 – Molas efetivas.



Fonte: Adaptado de Friedrich e Wang (2016).

Todavia, o modelo com tensão de cisalhamento constante pode não descrever o arrancamento de barras de aço corretamente, pois assim como mostraram os trabalhos de Li e Stang (1997), Lin e Li (1997) e Wang, Li e Backer (1988) a tensão de cisalhamento varia com o deslizamento da interface, causando comportamentos de endurecimento por escorregamento (*slip-hardening*) ou suavização por escorregamento (*slip-softening*), como visto na Figura 26.

Figura 26 – Três comportamentos típicos da curva de arrancamento de fibra/barra de aço.



Fonte: Adaptado de Kanda, Lin e Li (2000).

Diante disso, a rigidez da mola também é em função da variação de tensão de cisalhamento e deve ser determinada pela Equação 6.

$$k(s) = \frac{\tau(s)\pi d(Le-s)}{n(s)s} \quad (6)$$

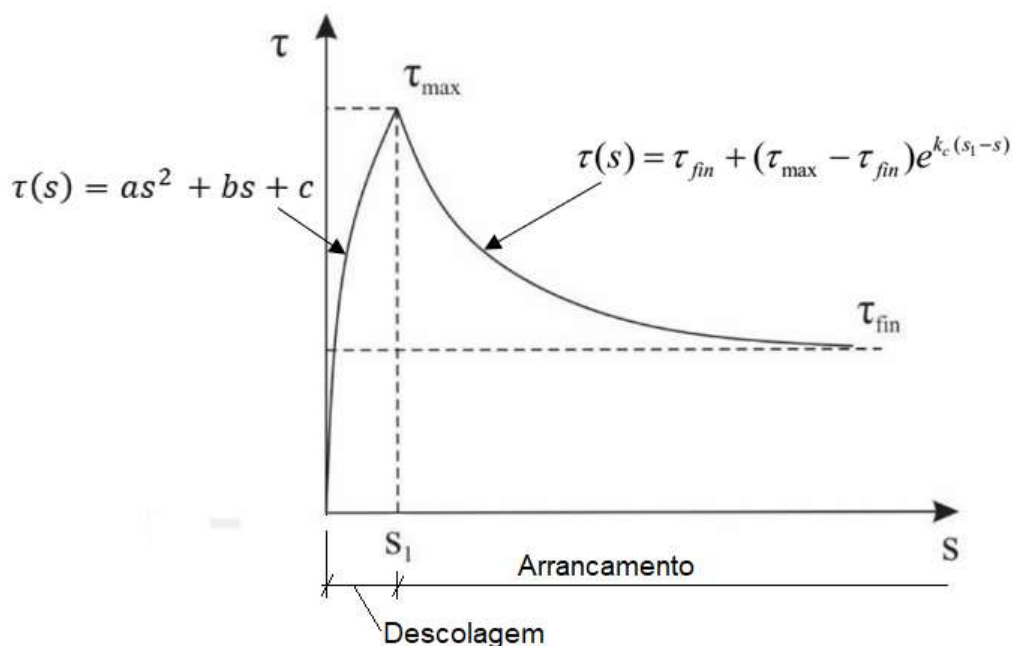
Nesta pesquisa foram adotadas duas curvas para tensão de cisalhamento, a fim de aproximar ao máximo a análise numérica com a curva experimental (A-CAA-C30-B10 da Figura 13) de Almeida Filho (2006). Portanto, durante a descolagem foi aplicada uma função do segundo grau, após a completa descolagem, o arrancamento baseou-se na função determinada pela Equação 7, proposta por Fantilli e Vallini (2003), a qual apresenta um comportamento de *slip softening*, de comportamento similar ao apresentado nos resultados experimentais de Almeida Filho (2006).

$$\tau(s) = \tau_{fin} + (\tau_{m\acute{a}x} - \tau_{fin}) e^{kc(s_1-s)} \quad \text{se } s > s_1 \quad (7)$$

onde, $\tau_{m\acute{a}x}$ é a tensão de cisalhamento máxima, s é o deslocamento aplicado, s_1 é o deslocamento aplicado imediatamente antes de ocorrer a descolagem por completo, kc é uma constante e τ_{fin} é o valor assintótico da tensão de cisalhamento.

Convém lembrar que os valores que foram testados para $\tau_{m\acute{a}x}$ e s_1 foram retirados do modelo de zonas coesivas, seção anterior, e do trabalho de Almeida Filho (2006). O gráfico da Figura 27 exemplifica os trechos e as funções que serão aplicadas a eles.

Figura 27 – Funções adotadas e seus respectivos trechos de aplicação.

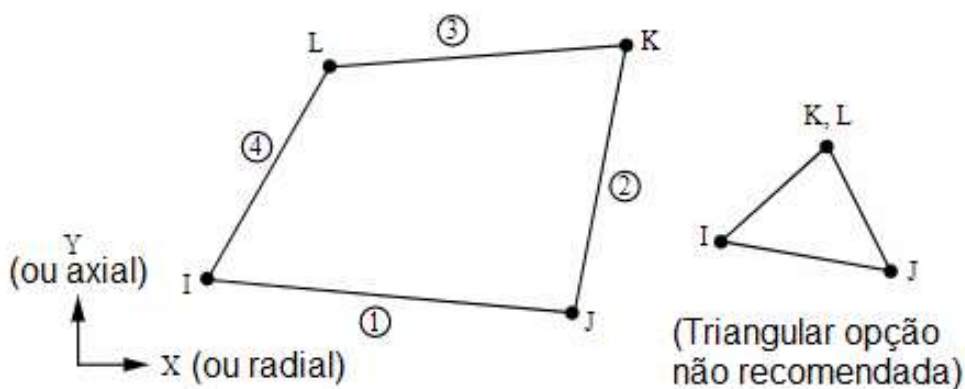


Fonte: Adaptado de Fantilli e Vallini (2003).

3.2.2.1 Tipo de Elemento

O PLANE 182, mostrado na Figura 28, é um tipo de elemento usado para modelar estruturas sólidas 2D e apresenta quatro nós com dois graus de liberdade em cada um dos nós: translações nodais em x e y . O elemento tem capacidade de plasticidade, hiperelasticidade, rigidez de tensão e grandes deflexão e deformação (ANSYS, 2007). O PLANE 182 foi aplicado em ambas as geometrias, ou seja, aplicou-se nas geometrias representativas da barra de aço e do concreto.

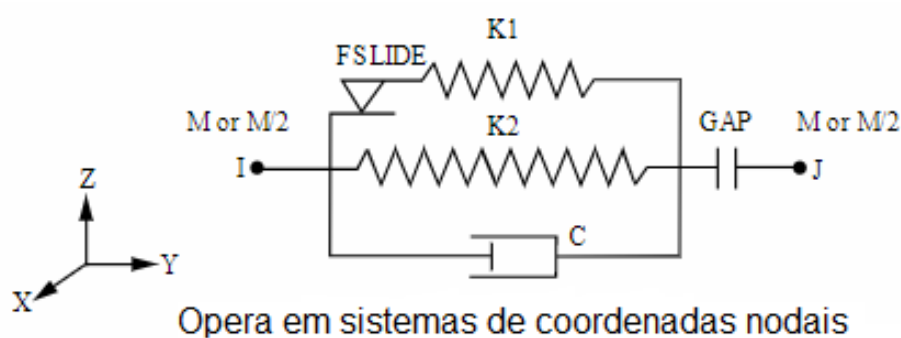
Figura 28 – PLANE 182.



Fonte: Adaptado de ANSYS (2007).

O tipo de elemento COMBIN 40, apresentado na Figura 29, é uma combinação de uma mola deslizante e um amortecedor em paralelo, acoplados em série. Uma massa pode ser adicionada a um ou ambos os pontos nodais. Além disso, o elemento possui um grau de liberdade em cada nó, podendo ser uma translação nodal, rotação, pressão ou temperatura (ANSYS, 2007). O elemento foi aplicado para simular o contato entre os materiais na região de interface.

Figura 29 – COMBIN40.

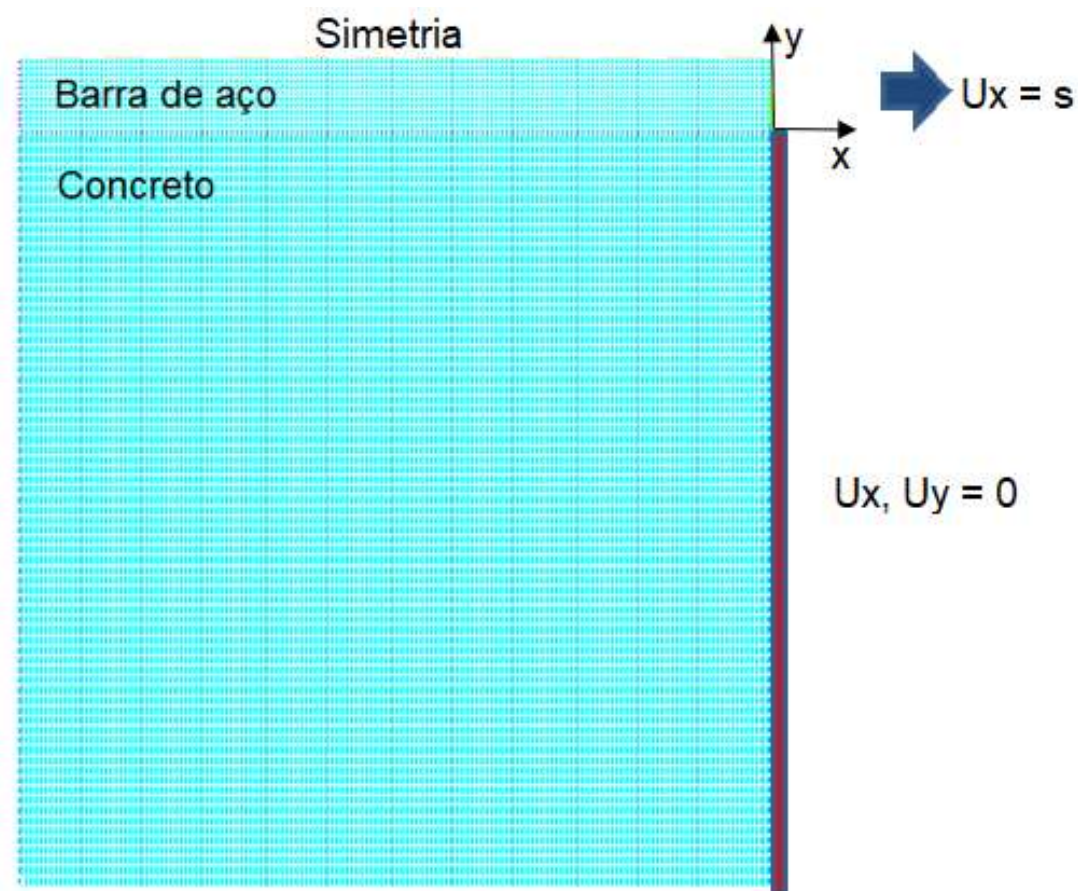


Fonte: Adaptado de ANSYS (2007).

3.2.2.2 Malha

Os elementos da malha possuem forma quadrada, apresentados na Figura 30. A malha empregada na barra de aço apresenta 1.800 elementos e 1.639 nós, e no concreto tem 11.250 elementos e 11.026 nós. A malha totaliza 13.050 elementos e 12.665 nós.

Figura 30 – Malha de elementos finitos.



Fonte: Elaboração própria.

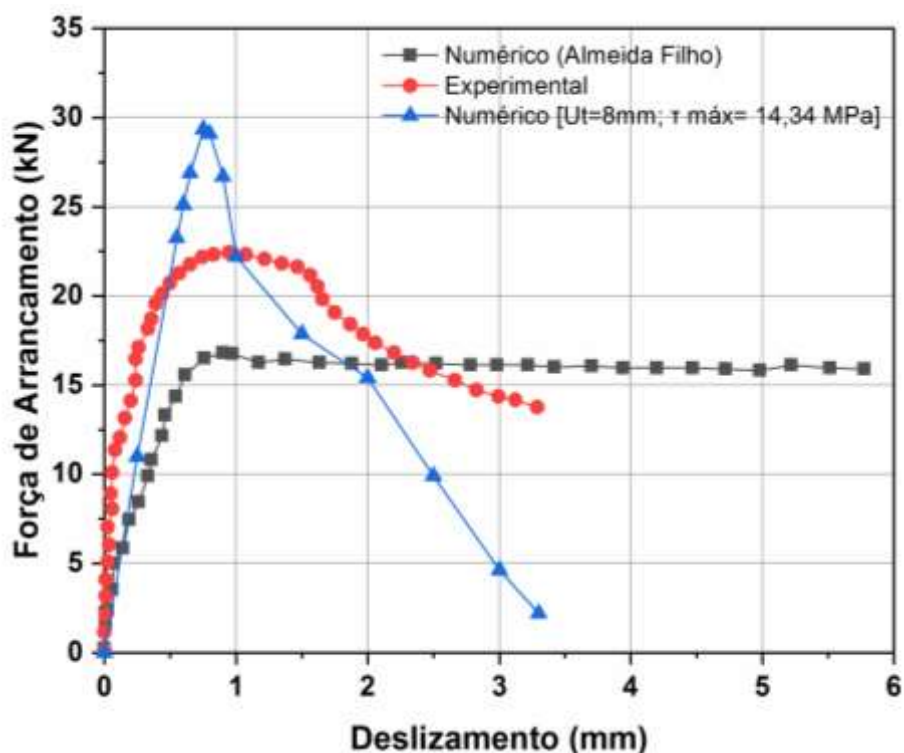
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Análise numérica aplicando o Modelo de contato + Materiais de Zonas Coesivas (CZM)

Almeida Filho (2006) determinou, a partir de ensaios de arrancamento utilizando concreto autoadensável e barra de 10mm, que a resistência última de aderência era de 14,34MPa e o deslizamento correspondente à força de ruptura do ensaio era de 0,96mm. Estes dados foram utilizados para calibrar os modelos com os dados experimentais.

Como foi citado anteriormente, o Modelo de contato + CZM necessita que o usuário entre com a tensão de cisalhamento máxima e o deslizamento necessário para a completa descolagem. Portanto, a tentativa inicial considerou a tensão de cisalhamento máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$) igual a resistência última de aderência encontrada por Almeida Filho (2006) e o deslizamento necessário foi estimado em (U_t) de 8mm. Na Figura 31 é apresentado o comportamento da curva força de arrancamento *versus* deslizamento, e além disso, comparando-o com as curvas de referência, experimental e numérica, de Almeida Filho (2006).

Figura 31 – Comparação entre os resultados de Almeida Filho (2006) e o modelo numérico aplicando CZM com $\tau_{m\acute{a}x} = 14,34 \text{ MPa}$ e $U_t=8\text{mm}$.

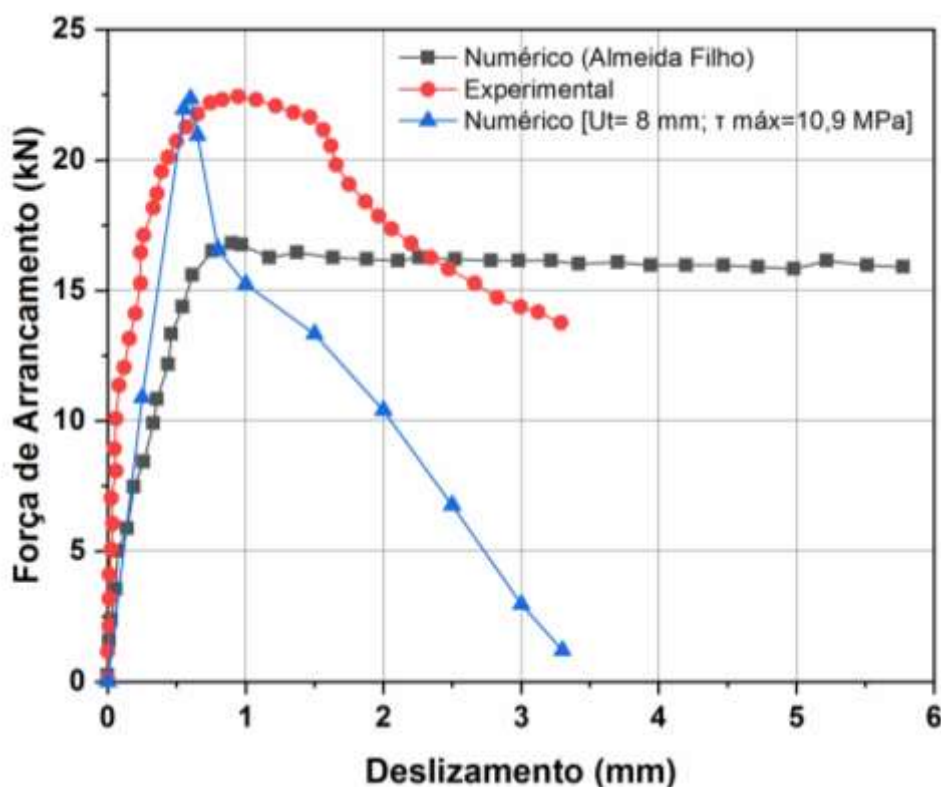


Fonte: Elaboração própria.

Os valores adotados não geraram uma curva com comportamento próximo ao experimental. Além disso, a força máxima de arrancamento obtida pelo modelo numérico foi 30,79% maior que o encontrado experimentalmente. A diferença entre os deslizamentos quando a força está no pico foi de aproximadamente 0,2mm.

O valor de $\tau_{m\acute{a}x}$ foi alterado para 10,9MPa, o que ocasionou uma melhor aproximação da força máxima de arrancamento, como pode ser visto na Figura 32. A diferença entre as forças obtidas pelos diferentes métodos foi de 0,1 kN. Todavia, o comportamento ainda não estava satisfatório, porque o modelo registrava uma queda brusca após o pico (ver curva azul), o que difere do comportamento experimental.

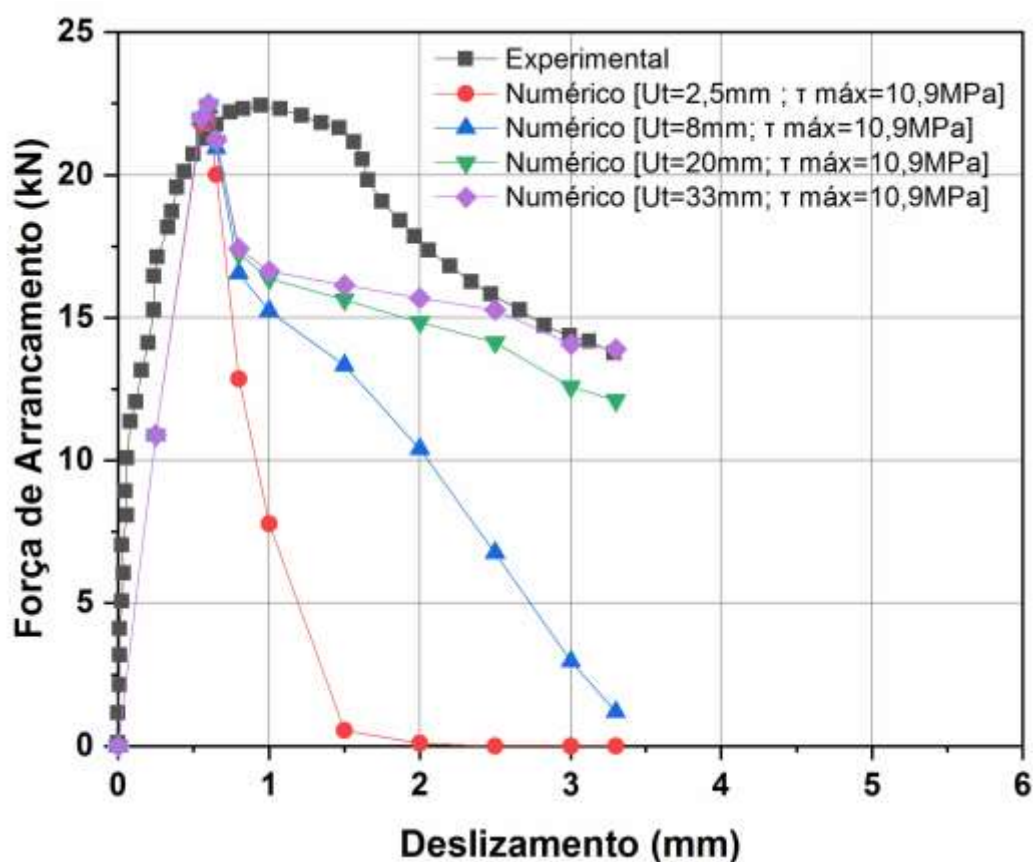
Figura 32 – Comparação entre os resultados de Almeida Filho (2006) e o modelo numérico aplicando CZM com $\tau_{m\acute{a}x} = 10,9MPa$ e $U_t=8mm$.



Fonte: Elaboração própria.

Foram avaliados então mais três valores de U_t , adotando-se 2,5 mm, 20 mm e 33 mm. Convém lembrar que o valor da tensão de cisalhamento máximo foi fixado em 10,9 MPa. A Figura 33 apresenta as curvas obtidas pelos novos valores e a curva experimental de referência.

Figura 33 – Comparação entre o resultado experimental de Almeida Filho (2006) e o modelo numérico aplicando CZM com $\tau_{m\acute{a}x} = 10,9MPa$ e U_t variando em 2,5 mm, 8 mm, 20 mm e 33 mm.

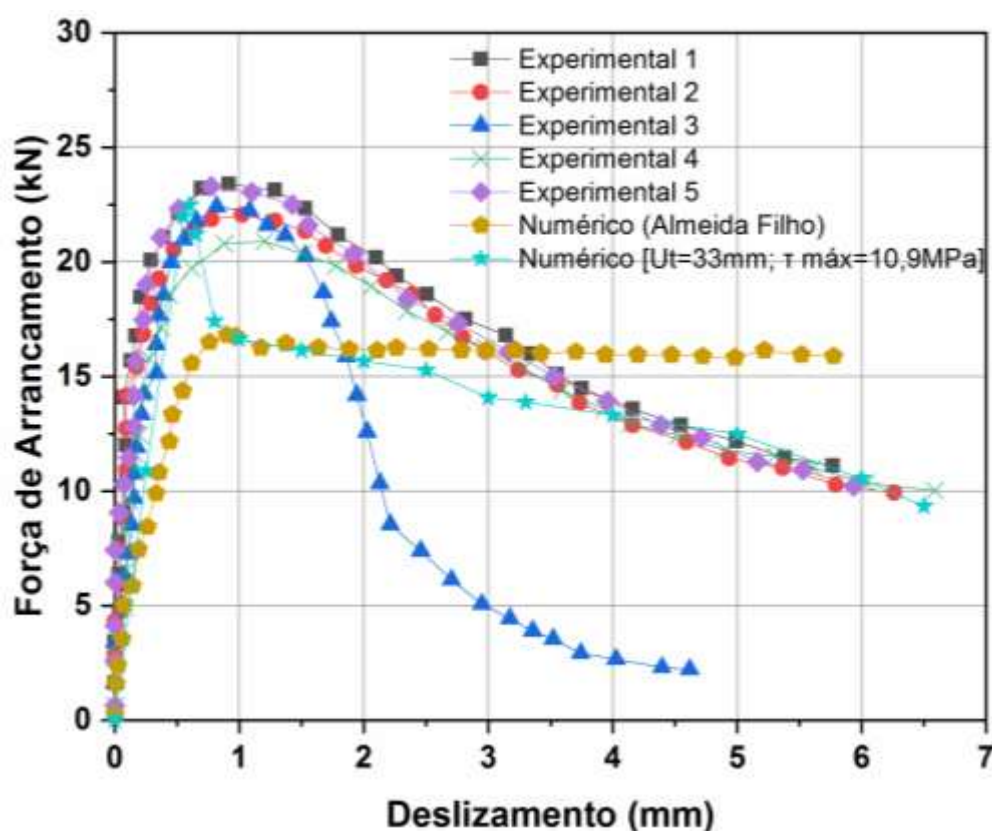


Fonte: Elaboração própria.

O comportamento imediatamente após a completa descolagem ainda não está próximo ao experimental. Uma possível solução para o problema é considerar o modo misto de descolagem das superfícies do CZM, ao invés do modo II utilizado nesta pesquisa. O modo misto pondera tanto o cisalhamento quanto a componente normal.

Todavia, analisando a curva como um todo, o resultado foi satisfatório e atingiu uma aproximação melhor que a análise numérica desenvolvida por Almeida Filho (2006). A Figura 34 mostra o resultado experimental obtido para os 5 espécimes ensaiados, o modelo numérico de Almeida Filho (2006) e o modelo aplicando CZM com $\tau_{m\acute{a}x} = 10,9MPa$ e $U_t = 33$ mm.

Figura 34 – Comparação entre os resultados experimentais e numéricos de Almeida Filho (2006) e o modelo numérico aplicando CZM com $\tau_{m\acute{a}x} = 10,9MPa$ e $U_t=33mm$.



Fonte: Elaboração própria.

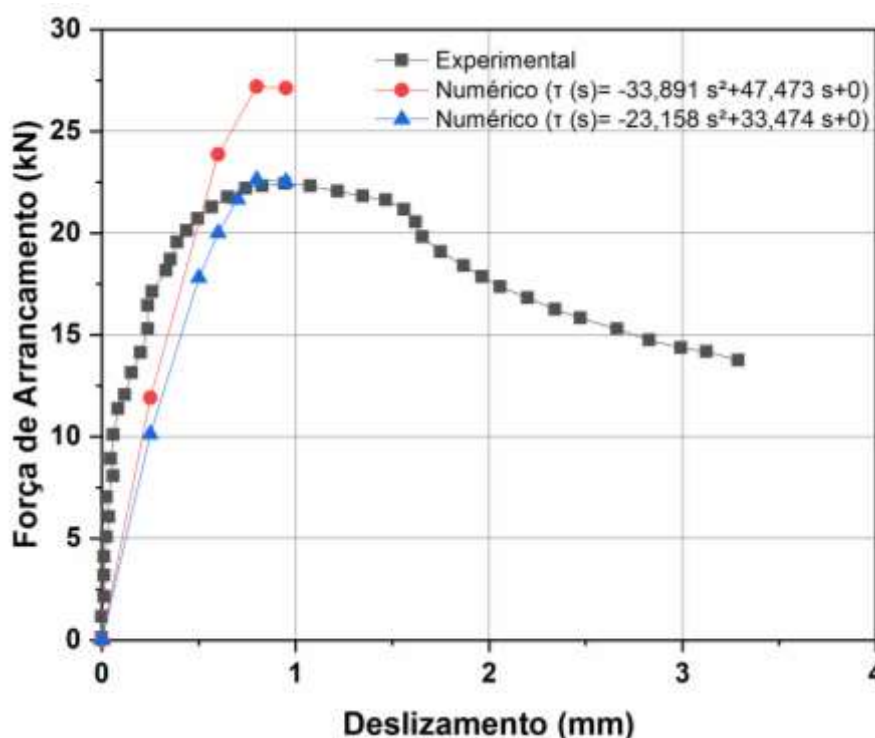
4.2 Análise numérica aplicando o Modelo de molas

Foram aplicadas duas funções para simular o comportamento da curva de força *versus* deslizamento, uma função para simular o trecho de descolagem e outra para o trecho de *pullout*. Para o trecho de descolagem até o pico da força de arrancamento, criou-se uma função do segundo grau, utilizando alguns valores que foram obtidos por Almeida Filho (2006) e pelo modelo numérico aplicando CZM desta pesquisa.

Inicialmente, foi considerado uma tensão máxima de cisalhamento de 14,34 MPa correspondente ao deslizamento de 0,96mm, retirados de Almeida Filho (2006). A função do segundo grau adotada foi: $\tau(s) = -33,891 s^2 + 47,473 s + 0$. O comportamento resultante não foi satisfatório. A força de arrancamento foi superestimada em cerca de 22% (ver curva vermelha), quando comparada a obtida experimentalmente conforme pode-se visualizar na Figura 35.

Com a finalidade de reduzir o valor máximo da força de arrancamento, foi testado o segundo valor para tensão máxima de cisalhamento, o qual foi retirado da análise que empregou o Modelo de contato associado ao Material de Zonas Coesivas, $\tau_{m\acute{a}x} = 10,9MPa$ e o deslizamento correspondente foi mantido em 0,96mm. A função de 2º grau adotada foi $\tau (s) = -23,158 s^2 + 33,474 s + 0$. Pode-se notar na Figura 35, que a força máxima encontrada na análise numérica ficou próxima da experimental (ver curva azul). Nota-se que a inclinação, obtida pela análise numérica, não coincide com a experimental, porém uma busca por mais funções, que possam descrever essa região, pode ser realizada em trabalhos futuros, visando obter uma melhor aproximação ao obtido em laboratório.

Figura 35 – Comparação entre as curvas experimental e numéricas aplicando o modelo de molas com funções: $\tau (s) = -33,891 s^2 + 47,473 s + 0$ e $\tau (s) = -23,158 s^2 + 33,474 s + 0$.



Fonte: Elaboração própria.

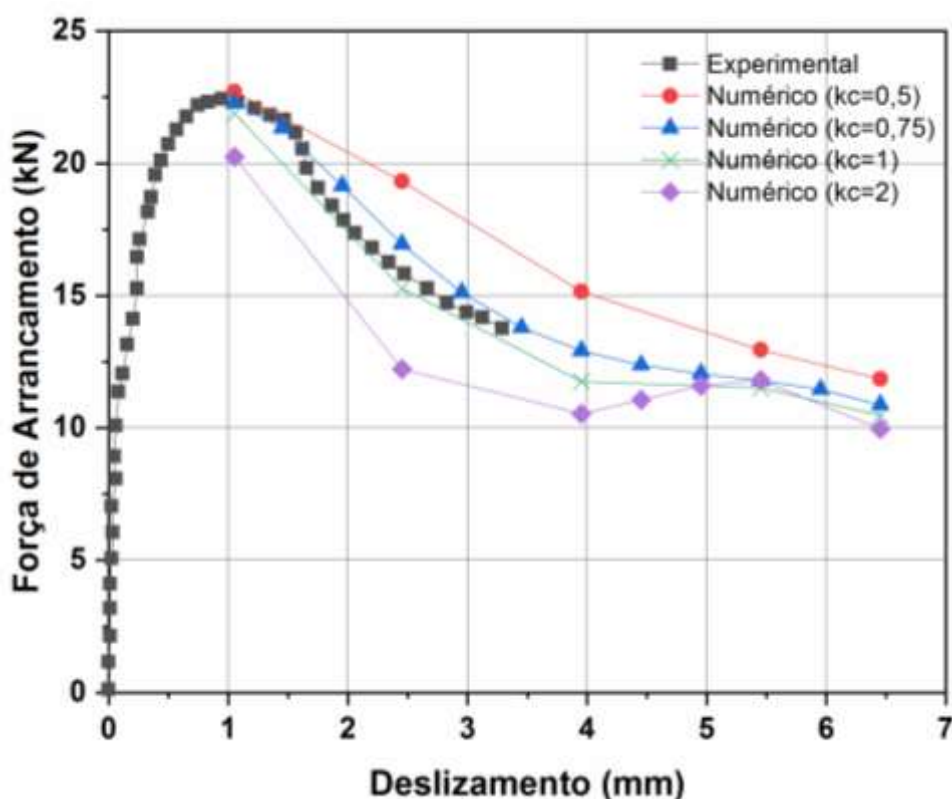
O comportamento da curva obtido numericamente, considerando a tensão máxima de cisalhamento igual à 10,9 MPa, apresentado na Figura 35, foi satisfatório. Então, iniciou-se o estudo da função que forneceria uma curva aproximada após o pico da força de arrancamento, ou seja, após a descolagem. Em suma, aplicou-se

para o trecho de *pullout* a função determinada pela Equação 7 (item 3.2.2 e pg. 49), formulada por Fantilli e Vallini (2003).

Ainda convém lembrar que foi considerado o deslizamento de 0,96mm para haver a descolagem por completo, ou seja, deslocamento correspondente à força de ruptura. Então, foi adotado $S_1=0,95$, que é o deslocamento aplicado imediatamente antes de ocorrer a descolagem por completo. Ademais, considerou-se $\tau_{máx} = 10,9 MPa$ e a tensão de cisalhamento mínima igual a $\tau_{fin} = 4 MPa$.

A análise do trecho de arrancamento foi realizada para quatro coeficientes kc , que são 0,5, 0,75, 1 e 2. Na figura 36, estão apresentadas as curvas geradas com os valores adotados e a curva experimental de referência. Os coeficientes (kc) de 0,75 e 1 apresentaram comportamentos bastante similares entre si e com o experimental. No entanto, o $kc = 0,75$ obteve um valor para força máxima de arrancamento mais próximo ao obtido em laboratório (ver curva azul escuro).

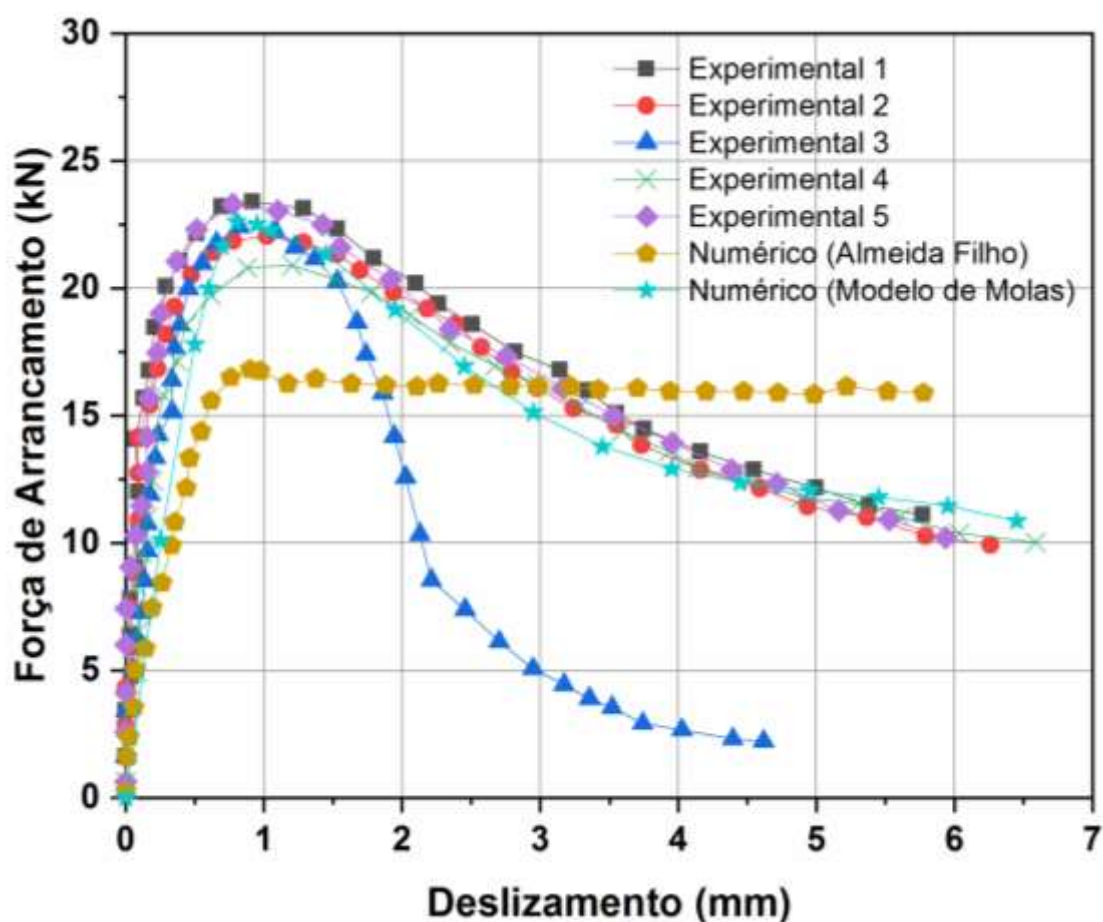
Figura 36 – Comparação entre as curvas experimental e numéricas aplicando a Equação de Fantilli e Vallini (2003) com valores para kc de 0,25, 0,75, 1 e 2.



Fonte: Elaboração própria.

A associação das curvas dos trechos de descolagem e arrancamento do modelo de molas tiveram uma boa aproximação com as obtidas em laboratório. Pode-se conferir a afirmação no gráfico da Figura 37, o qual apresenta os resultados experimentais dos 5 espécimes ensaiados e numéricos obtidos por Almeida Filho (2006), e os resultados numéricos aplicando o modelo de molas.

Figura 37 – Comparação entre os resultados experimentais e numéricos de Almeida Filho (2006) e o modelo numérico aplicando o modelo de molas com $k_c = 0,75$.



Fonte: Elaboração própria.

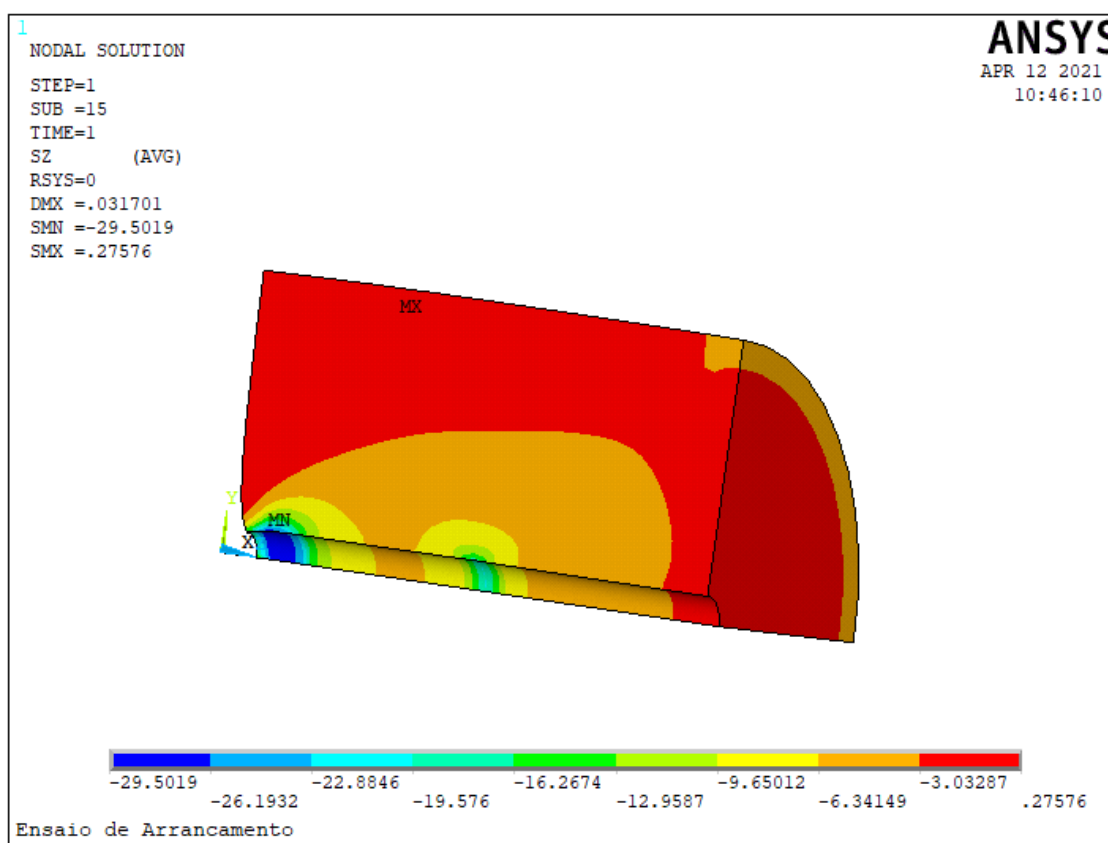
4.3 Considerações finais

Neste trabalho não foram consideradas possíveis falhas do concreto (esmagamento e fratura) e da barra de aço (escoamento). Porém, uma análise simples observando as tensões na direção do arrancamento podem trazer algumas informações para trabalhos futuros.

As Figuras 38 e 39 mostram o campo de tensões na direção z (direção do arrancamento) para a matriz de concreto e para a barra, respectivamente, obtidos pelo modelo de contato associado a Materiais de Zonas Coesivas (CZM) ao aplicar o deslocamento que causa a maior força de arrancamento. As tensões positivas são de tração e negativas de compressão.

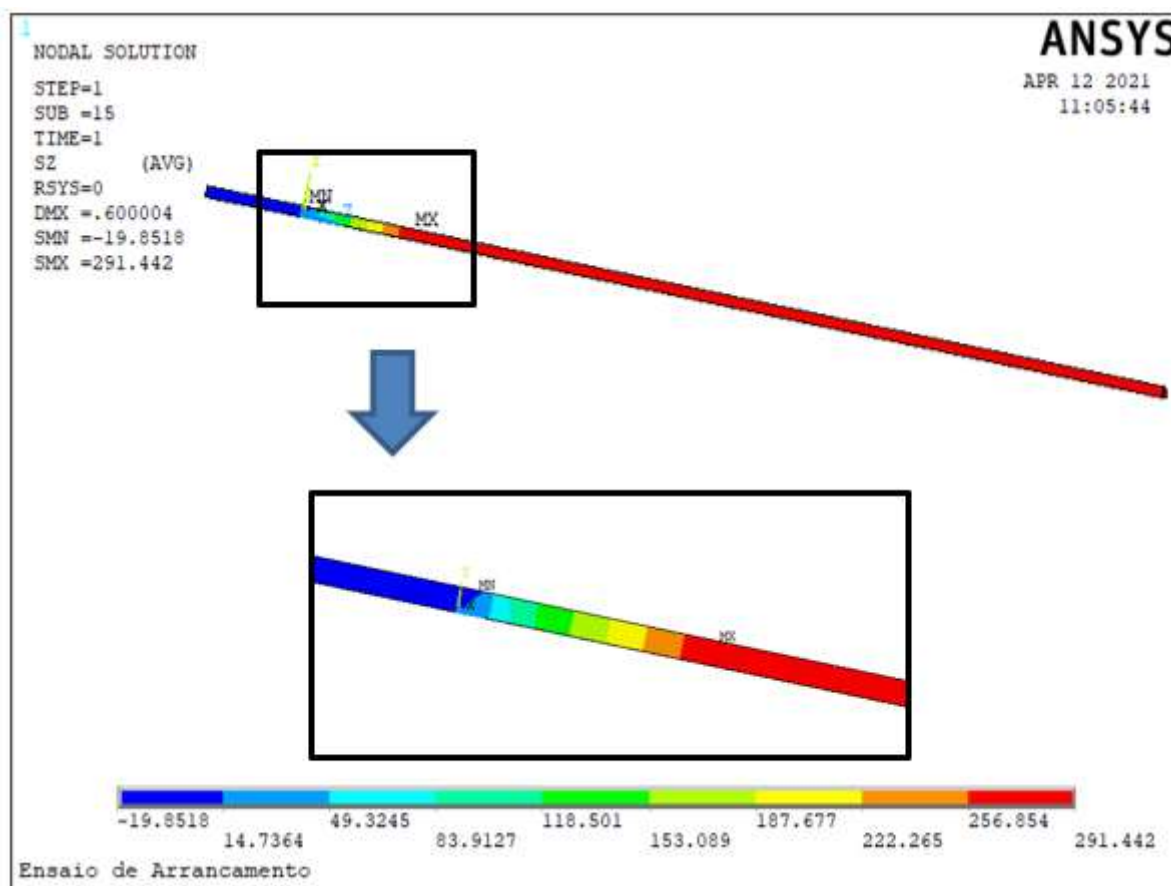
Neste modelo, nota-se que, durante o processo de simulação, a tensão de compressão máxima atuante no concreto ficou bastante próxima da resistência à compressão do compósito, a qual foi determinada experimentalmente por Almeida Filho (2006) em 30,10MPa, o que poderia gerar uma falha do material. Porém, como não se incluiu a possibilidade de falha do material, tal fato não se refletiu diretamente sobre a resposta do modelo. Essa possibilidade poderá ser implementada em uma nova frente de estudo sobre o tema. A tensão de escoamento da barra ($f_y = 550\text{MPa}$) não foi ultrapassada, como aconteceu nos modelos numéricos de Tavares (2012), Rosales (2016) e Almeida Filho (2006) e nos experimentais de Vale Silva (2010), Rosales (2016) e Almeida Filho (2006).

Figura 38 – Campo de tensões em MPa na direção z para a matriz de concreto.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 39 – Campo de tensões em MPa na direção z para a barra de aço.

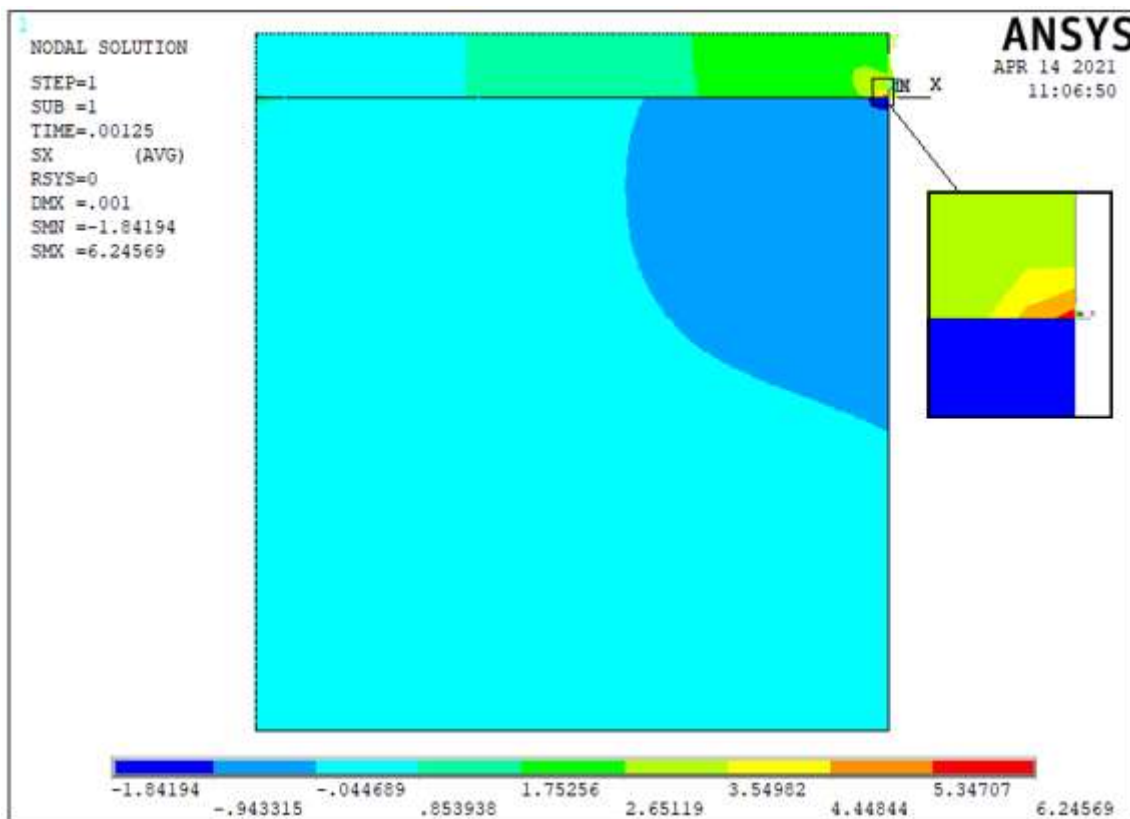


Fonte: Elaboração própria.

Nesta pesquisa o modelo com material de zonas coesivas (CZM) não apresentou grandes falhas. Contudo, deve-se ter atenção ao extrapolar a análise para outras configurações de ensaio, principalmente, nas tensões de compressão e tração do concreto que ao superar as resistências do material aumentam a intensidade das falhas. Portanto, adaptar o modelo para serem consideradas as falhas pode mostrar-se como uma excelente alternativa.

A Figura 40 mostra o campo de tensões na direção x (direção do arrancamento) para a matriz de concreto e para a barra de aço, obtidos pelo modelo de molas durante a descolagem, aplicando o deslocamento que causa a força de arrancamento máxima. Percebe-se que as tensões de tração e compressão máxima do concreto não foram atingidas durante os processos de simulação.

Figura 40 – Campo de tensões em MPa na direção x para barra de aço e concreto aplicando-se o modelo de molas, durante a descolagem.



Fonte: Elaboração própria.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho objetivou estudar o mecanismo de aderência, a partir de análises numéricas, baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF), afim de obter comportamentos semelhantes aos obtidos experimentalmente.

Aplicou-se duas abordagens diferentes para a simulação do contato entre a matriz e a barra de aço, ambos métodos foram satisfatórios ao considerar uma tensão de cisalhamento máximo ($\tau_{m\acute{a}x}$) de 10,9 MPa, o que acarretou em uma força máxima de arrancamento de aproximadamente 22,48 kN, ao utilizar elementos de contato e materiais de zonas coesivas, e 22,61 kN ao aplicar o modelo de molas. Por conseguinte, bastante próximas as obtidas em laboratório por Almeida Filho (2006).

Em relação ao deslizamento correspondente a força máxima de arrancamento, em outros termos, o deslizamento no pico da curva, os modelos apresentaram uma maior discrepância entre os valores. O modelo aplicando materiais de zonas coesivas (CZM) alcançou o valor máximo de carga quando o deslizamento era próximo de 0,6mm e o modelo de molas o deslizamento era de 0,8mm, aproximadamente. A partir dos ensaios de laboratório, o valor ficou em 0,96mm. O modelo com CZM pode ser mais estudado, afim de encontrar um deslocamento mais próximo ao experimental.

Ademais, o deslizamento necessário para a completa descolagem da interface de contato entre concreto e aço, ao aplicar elementos de contato e materiais de zonas coesivas, varia conforme a análise. Contudo, U_t de 33mm é suficiente para contribuir com o comportamento final da curva numérica semelhante ao obtido de maneira experimental.

Ao aumentar o coeficiente k_c no modelo de molas, que governa o comportamento de arrancamento, a força máxima obtida diminui. O valor ficou próximo ao experimental na faixa de k_c entre 0,5 a 1, sendo o valor de 0,75 que favoreceu o comportamento da curva mais próximo ao experimental.

Os comportamentos das curvas numéricas foram bastante satisfatórios, principalmente o modelo que empregou molas para simular a região de interface, o qual resultou em uma curva mais próxima à experimental. O modelo com CZM teve uma maior variação na região após a descolagem e início do arrancamento, por isso deve haver uma maior investigação com a finalidade de melhorar o comportamento nesse trecho.

Ao comparar as curvas numéricas obtidas neste trabalho com as encontradas por Almeida Filho (2006), pode-se visualizar que os modelos empregados nesta pesquisa se aproximaram mais dos resultados experimentais dos ensaios de arrancamento, normalizado pela RILEM-FIP-CEB (1973), realizados pelo autor.

Sugestões para trabalhos futuros

Para uma análise numérica mais condizente com o real comportamento dos materiais, concreto e barra de aço, algumas alternativas para trabalhos futuros são sugeridas:

- No modelo utilizando elementos de contato e material de zona coesiva deve-se adaptar para que o comportamento dos materiais seja representado completamente e não somente o comportamento linear elástico. Portanto, deve-se incluir a curva de tensão-deformação do concreto em compressão.
- Avaliar a possibilidade de alterar o modo de descolagem para misto, ao invés do modo II, na simulação empregando materiais de zonas coesivas (CZM).
- Buscar por mais funções que possam descrever a região de descolagem da curva força de arrancamento *versus* deslizamento, ao utilizar o modelo de molas, a fim de se obter uma melhor aproximação ao obtido experimentalmente.
- Aplicar ao modelo de molas, algum tipo de aleatoriedade nas características de cada mola, podendo as mesmas representar defeitos na interface como, por exemplo, a presença de poros, o que poderia tornar o modelo mais realista.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA FILHO, F. M. **Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

ANSYS Academic Research, Release 11.0, Help System, ANSYS, Inc., 2007.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1. Ed. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003. 248 p.

CAETANO, L. F. **Estudo do comportamento da aderência em elementos de concreto armado submetidos à corrosão e elevadas temperaturas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

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

Comité Euro-international du béton. **CEB-FIP Model Code 1990: Design Code**. n. 213-214. Switzerland, Lausanne: Thomas Telford, 1993. 462 p.

COSTA, E. et al. Modelagem numérica do ensaio de resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa. In: **III CONGRESSO DE PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO DA UFG – CONPEEX**, Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2006.

CUNHA, J.; SOUZA JUNIOR, D. A. Avaliação estrutural de peças de madeira reforçadas por fibras de carbono. **Revista Engenharia Civil**, v. 20, p. 71-81, 2004.

FANTILLI, A. P.; VALLINI, P. A cohesive model for fiber-reinforced composites. In: **Proceedings ISEC-02 Conference**, Balkema, 1443–1449, 2003.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 248 p. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2011.

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

FRIEDRICH, L. F. **Modelo computacional do aumento da tenacidade do concreto de reforço por fibras utilizando ANSYS**. 2016. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

FRIEDRICH, L. F.; WANG, C. Continuous Modeling Technique of Fiber Pullout from a Cement Matrix with Different Interface Mechanical Properties Using Finite Element Program. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v13, p. 1937-1953, 2016.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1995. 382 p.

GOPALARATNAM, V. S.; SHAH, S. P. Tensile failure of steel fiber-reinforced mortar. **Journal of Engineering Mechanics**, v.113, n.5, p. 635-652, 1987.

KANDA, T.; LIN, Z.; LI, V.C. Tensile stress-strain modeling of pseudostrain hardening cementitious composites, **ASCE Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 147-156, mai. 2000.

LAZZARI, B. M. **Análise por elementos finitos de peças de concreto armado e protendido sob estados planos de tensão**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

LAZZARI, P. M. **Simulação numérica das etapas construtivas de pontes estaiadas através do método dos elementos finitos**. 2016. 301 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

LEONHARDT, F.; MÖNNING, E. **Construções de concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. vol. 1**. 2. Reimpr. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 336 p.

LI, V. C. Post-crack scaling relations for fiber reinforced cementitious composites, **ASCE Journal of Materials in Civil Engineering**, v.4, n.1, p. 41-57, 1992.

LI, V. C.; STANG, H. Interface property characterization and strengthening mechanisms in fiber reinforced cement based composites. **Advanced Cement Based Materials**, v.6, p. 1-20, 1997.

LIN, Z.; LI, V. C. Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v.45, n.5, p. 763-787, 1997.

MARINHO, I. J. P. **Projeto ótimo de estruturas metálicas de arquibancadas reutilizáveis via ANSYS**. 2002. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

MARSHALL, D.B.; COX, B.N; EVANS, A.G. The mechanics of matrix cracking in brittle matrix fiber composites. **Acta Metall**, v.33, n.11, p. 2013-2021, 1985.

MORAIS, V. C. **Análise dinâmica não determinística de edifícios mistos (aço-concreto) submetidos à ação de cargas de vento**. 2014. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

REDDY, J. N. **An introduction to the finite element method**. 2. ed. McGraw-Hill, 1993. 684 p.

RILEM-FIP-CEB. Bond teste for reinforcing steel: 2-Pull-out test (7-II-128): Tentative recommendations. **RILEM Journal Materials and Structures**. v.6, n.32, p. 103-105. Março-abril. 1973.

RODRIGUES, J.; FORTI, N. C. S. Análise numérica da aderência entre aço e concreto ensaio pull-out test. In: **XX Encontro de Iniciação Científica e V Encontro de iniciação em desenvolvimento Tecnológico e Inovação**. Campinas: PUC, 2015.

ROSALES, Y. M. **Análise numérica-experimental do comportamento da aderência aço-concreto**. 2016. 119 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SENA-CRUZ, J. et al. Modelling of bond between galvanized steel rebars and concrete. In: **Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería**. Barcelona, 2009.

SILVA, J. G. S. et al. Uma experiência acadêmica nos cursos de graduação da faculdade de Engenharia da UERJ a partir da utilização do programa Ansys. In: **XXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, COBENGE**, Porto Alegre, p. 96-105, 2001.

SILVA, R. D. **Estudo da aderência aço-concreto em pilares mistos preenchidos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SIMPLÍCIO, M. A. S. **Estudo sobre a aderência entre barras de aço e concreto reforçado com fibras**. 2008. 261 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SORIANO, H. L.; LIMA, S. S. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. Vol. 48. São Paulo: EdUSP, 2003. 580 p.

TAVARES, A. J. **Aderência aço-concreto: análise numérica dos ensaios pull-out e APULOT**. 2012. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

TOJAL, T. L. **Contribuição ao estudo da aderência de barras de aço em concreto autoadensável reforçado com fibras metálicas**. 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

VALE SILVA, B. **Investigação do potencial dos ensaios APULOT e pull-out para estimativa da resistência a compressão do concreto**. 2010. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

WANG Y.; LI, V. C.; BACKER S. Modeling of fiber pullout from a cement matrix. **The international journal of cement composites and lightweight concrete**, v.10, n.3, p. 143-149, 1988.