



Luiza Carneiro Marinho

**Estudo Experimental e Numérico
de Diferentes Configurações do
Ensaio de Tração por
Compressão Diametral**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Estruturas do
departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadora: Prof^a. Deane Mesquita Roehl
Coorientadora: Lourdes Maria Silva de Souza

Rio de Janeiro
Agosto de 2019



Luiza Carneiro Marinho

**Estudo Experimental e Numérico de
Diferentes Configurações do Ensaio
de Tração por Compressão Diametral**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil da
PUC-Rio. Aprovada pela Comissão
Examinadora abaixo.

Prof^a. Deane Mesquita Roehl

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Dr^a. Lourdes Maria Silva de Souza

Coorientadora

Instituto Tecgraf – PUC-Rio

Prof. Flávio Silva

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Givanildo Alves de Azerêdo

Universidade Federal da Paraíba

Rio de Janeiro, 23 de Agosto de 2019

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Luiza Carneiro Marinho

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Pará – UFPA – em 2017. Ingressou no mestrado da PUC-Rio em 2017 na área de estruturas.

Ficha Catalográfica

Carneiro Marinho, Luiza

Estudo experimental e numérico de diferentes configurações do ensaio de tração por compressão diametral / Luiza Carneiro Marinho; orientadoras: Deane Mesquita Roel, Lourdes Maria Silva de Souza. – 2019.

104 f.: il. color.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Ensaio Brasileiro. 3. Análise Experimental. 4. Simulação Numérica. 5. Argamassa Cimentícia. I. Roel, Deane Mesquita. II. Souza, Lourdes Maria Silva de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD 624

Dedico essa dissertação aos meus queridos avós,
que sempre estarão junto comigo
dentro do meu coração.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter abençoado meu caminho até aqui, por ser tão presente no meu dia a dia, zelando e sendo amoroso comigo.

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

Sou muito grata pelos meus pais terem me proporcionado essa experiência que foi fazer um mestrado, e por terem acreditado e investido nesse meu sonho junto comigo. Obrigada mãe, por sempre estar ao meu lado, seja me ligando sempre, seja querendo me ver, ou somente por existir, a senhora é a minha inspiração e sempre a carrego juntinho de mim, no meu coração.

Obrigada Pedro, meu irmão, por ter me dado forças e pelo carinho quando passei por dificuldades nesse meu caminho, e não foram poucas... Mas sempre você estava pronto para me ouvir e me ajudar como podia.

Agradeço pela minha família ter vindo me visitar algumas vezes ao longo desses dois anos e meio, foi muito bom poder matar a saudade que eu estava de vocês.

Obrigada Gaya, minha prima querida, por sempre, sempre estender a mão e me ajudar em todos os momentos que eu precisei. Não tenho palavras para descrever o quanto você me ajudou a superar momentos de dificuldade que eu pensei que não fosse suportar... Você é muito importante na minha vida, agradeço por todos os momentos que passamos juntas, de coração.

Obrigada Josi, minha grande amiga que considero uma irmã, por ter me dado apoio em um dos momentos que mais tive dificuldade no mestrado, quando eu fiz a minha primeira prova. Por dividir esse sonho comigo de fazer um mestrado, compartilhando todas as experiências, as dificuldades, e sim, os sucessos! Por ter me visitado aqui no Rio, e por ser presente na minha vida.

Agradeço por ter conhecido você Germano, meu namorado e grande amor. Se eu consegui chegar até aqui foi porque você é uma peça fundamental nisso. Sem você eu não teria conseguido, pois é o meu maior fã, o que mais acredita no meu potencial, o que mais torce pelo meu sucesso, e o que mais estendeu a mão e me ajudou em todos os momentos que eu mais precisei nessa jornada. Obrigada por sempre estar aqui comigo, sendo meu melhor amigo, compartilhando os momentos de dificuldade e felicidade, por ter me proporcionado momentos incríveis e por ter me dado força para continuar e finalizar o meu mestrado.

Obrigada minha priminha de coração, Nathy, por ter ficado aqui em casa comigo e ter dividido momentos maravilhosos. Rimos muito, choramos outros tantos, nos divertimos, comemos demais, e também compartilhamos momentos de vitória, como você sendo efetivada no seu emprego, parabéns, você merece!

Agradeço a Lourdes e Marcelo por terem me ajudado a realizar meus ensaios experimentais e por terem me ensinado o que eu sei hoje a respeito do ensaio brasileiro. Em especial a Lourdes por ter me ajudado bastante na correção do meu texto e por ser presente em qualquer momento que eu precisasse de ajuda, você foi muito importante para eu conseguir finalizar minha pesquisa e dissertação.

Obrigada João e Marlon por terem me ajudado bastante nos meus ensaios no laboratório, sem vocês eu não teria conseguido. Em especial ao João, que entrou nessa junto comigo, desde o início, sendo meu aluno de iniciação científica, e depois se tornando um dos meus grandes amigos. Nós compartilhamos muita coisa, desde várias risadas sobre coisas da vida em geral, dando conselhos um ao outro, tomar cerveja estragada, até o nosso sucesso, no meu caso concluir o mestrado, e no seu uma publicação de um artigo autoral sobre ensaio brasileiro. Parabéns menino, você vai longe!

Agradeço ao Euclides, o Zé, o Marques, o Brunão e ao Rogério, os técnicos do laboratório da PUC-Rio mais gente boa que eu conheço! Sério, vocês são incríveis. Obrigada por sempre serem solícitos quando eu precisei e por me ajudarem a realizar os meus ensaios, dedico a vocês a conclusão dos meus ensaios experimentais.

Agradeço aos meus amigos que compartilharam comigo as experiências no laboratório, e dividiram momentos muito especiais, como comemoração de aniversários, festinhas e almoços.

Obrigada professora Deane por ter me acolhido como sua mestranda e por ter acreditado em mim. Agradeço por ter ficado várias vezes mais entusiasmada do que eu a respeito da minha pesquisa, ter vibrado com os meus resultados, por ter me ajudado a escrever meu texto e por ter me ajudado a analisar meus resultados numéricos. A senhora foi como uma segunda mãe para mim, tiveram momentos que puxou minha orelha, e tiveram momentos de felicidade também. Obrigada por tudo.

Agradeço ao pessoal do Tecgraf por terem me proporcionado momentos muito especiais que me fizeram felizes e puderam aliviar um pouco a tensão do mestrado, como trazerem bombons de lembrancinha de viagens, realizar comemorações de aniversários na copa com direito a docinhos e bolos muito gostosos, e por compartilhar dia a dia esse meu caminho. Em especial ao Cristian, Pedro, Júlio e Marcelo Congro por terem me ajudado bastante com minha simulação numérica, sendo sempre bem solícitos quando precisava de ajuda, principalmente o Cristian que sempre estava presente e me ajudou muito nas análises.

Agradeço aos amigos que conheci no mestrado, por terem dividido comigo todo esse caminho, desde as salas de aula, estudos, várias dificuldades, apresentações de trabalhos importantes, até momentos de descontração e felizes, como passeios, surpresa do meu aniversário, almoçar junto e se divertir.

Obrigada Verissa, minha grande amiga que conheci na UFPA e que atualmente mora comigo há um ano e meio. A sua chegada aqui no Rio para também fazer um mestrado foi de suma importância para mim, pois eu estava passando por momentos de muita dificuldade saindo do meu antigo apartamento e pude encontrar em você a paz e força que eu estava precisando. Agradeço por todas as nossas conversas, por ser uma pessoa muito maravilhosa em todos os aspectos e por ter me ajudado em muitos momentos difíceis que eu mais precisava.

Obrigada minha querida amiga Bárbara, que o mestrado me proporcionou conhecer, por ser essa pessoa única e maravilhosa que és. Te considero uma das minhas melhores amigas, pois você dividiu comigo vários momentos de dificuldade, me dando conselhos, puxando minha orelha, brigando comigo quando precisava, como também muitos outros momentos de felicidade, como sua festinha de aniversário, assistir sua defesa de mestrado, me dar dicas de moda, rir das minhas doidices, me dar suporte e forças quando precisei e por acreditar em mim. E claro, por me ajudar na minha dissertação, a formatar meu texto, você é muito especial.

Agradeço aos amigos que eu conheci durante o mestrado, vocês me proporcionaram momentos incríveis e foram capazes de amenizar toda aquela pressão que eu tinha do mestrado e me fizeram ficar mais leve e feliz.

Agradeço a minha amiga Isabelle e Catarina por terem me ajudado e me dado apoio em vários momentos que eu precisei. Obrigada pelo grande carinho que vocês têm por mim.

Resumo

Carneiro Marinho, Luiza; Mesquita Roehl, Deane (Orientadora); Silva de Souza, Lourdes Maria (Coorientadora). **Estudo experimental e numérico de diferentes configurações do ensaio de tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro, 2019. 104 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação trata da realização e comparação das diferentes configurações de aplicação de carga no Ensaio Brasileiro com discos de argamassa cimentícia. Desenvolvido por (Carneiro 1943) o ensaio brasileiro busca avaliar a resistência a tração dos materiais de maneira indireta. As configurações de ensaio estudadas são: aplicação direta de carga, utilização de ripas de madeira entre o disco e a máquina, utilização de tiras de papelão entre o corpo de prova e a máquina, emprego de mordentes de aço envolvendo o disco, utilização de barras de aço entre o disco e a máquina e uma mudança na geometria do disco com cortes retos nas extremidades superior e inferior do mesmo. Para analisar a abertura de fissuras, fotos foram tiradas ao longo do ensaio. Uma das faces do disco foi caracterizada com padrão pontilhado a fim de possibilitar a análise por meio de correlação digital de imagem (DIC) utilizando-se o programa GOM Correlate. A análise experimental de maneira geral foi satisfatória, exceto os resultados com o uso de mordentes de aço, pois as rigidezes iniciais dos discos ensaiados nessa condição de aplicação de carga foram bem distintas. Não foi possível a análise da abertura de fissura nos estágios iniciais por DIC. Além dos ensaios brasileiros, foram realizados ensaios de compressão uniaxial para obter as propriedades mecânicas do material, como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Realizou-se um estudo numérico para as condições de aplicação direta de carga e com o uso de mordentes de aço, a fim de avaliar a distribuição de tensões no corpo de prova e comparar com os resultados experimentais. Utilizou-se o programa Abaqus para a simulação numérica de elementos finitos com elementos de contínuo 2D e de interface para permitir a formação de fissuras. Em ambas as configurações de ensaio os resultados numéricos foram bastante próximos dos resultados experimentais.

Palavras-Chave

Ensaio Brasileiro; Análise experimental; Simulação Numérica; Argamassa Cimentícia.

Abstract

Carneiro Marinho, Luiza; Roehl Mosque, Deane (Advisor); Silva de Souza, Lourdes Maria (Co-Advisor). **Experimental and numerical study of different configurations of the diametral compression tensile test**. Rio de Janeiro, 2019. 104 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study consists in the realization and comparison of the different configurations of the Brazilian test proposed in the literature. Developed by Carneiro (1943) the Brazilian test seeks to evaluate the tensile strength of materials indirectly. The tested configurations are: direct load application, use of wood slats between the disc and the machine, use of cardboard strips between the specimen and the machine, use of steel jaws surrounding the disk, use of steel bars between the disk and the machine and a change in the geometry of the disk with straight cuts on the upper and lower ends of the disk. In order to analyze the crack opening, photos were taken throughout test. One of the faces of the specimen was characterized with a speckled pattern to allow the analysis through the digital correlation of images performed using the GOM Correlate program. Experimental results were generally satisfactory, except for those with steel jaws, since the initial stiffness of the discs tested were quite different. It was not possible to visualize the appearance of cracks in the early stages of the tests through DIC analysis. In addition to the Brazilian tests, uniaxial compression tests were performed to obtain the mechanical properties of the material, such as modulus of elasticity and Poisson's ratio. A numerical study was performed with the boundary conditions of direct application of load and the use of steel jaws, in order to assess stress distribution and compare with the experimental results. The Abaqus program was used for numerical simulation. The disks were modeled with 2D continuum elements and interface elements represent the fractures. The numerical results were in good agreement with the corresponding experiments.

Keywords

Brazilian Test; Experimental Analysis; Numerical Simulation; Mortar.

Sumário

1	Introdução	20
1.1	Motivação	20
1.2	Objetivo	21
1.3	Organização do trabalho	21
2	Revisão Bibliográfica	23
2.1	Histórico	23
2.2	Soluções Analíticas	24
2.3	Resistência à tração segundo as normas	29
2.4	Estudo das condições de contorno do ensaio brasileiro	31
2.5	Modelos numéricos desenvolvidos para simular os ensaios brasileiros	33
2.6	Discussões a respeito do ensaio brasileiro	35
3	Materiais e métodos	38
3.1	Materiais	38
3.2	Métodos	40
3.2.1	Ensaio Brasileiro	40
3.2.1.1	Aplicação direta de carga	44
3.2.1.2	Aplicação de carga por meio de ripas de madeira	44
3.2.1.3	Aplicação de carga por meio de tiras de papelão	45
3.2.1.4	Aplicação de carga por meio de mordentes de aço	45
3.2.1.5	Aplicação de carga por meio de barras de aço	46
3.2.1.6	Aplicação e carga sobre chanfros	47
3.2.2	Ensaio de compressão uniaxial	49
4	Ensaaios experimentais e resultados	52
4.1	Digital image correlation (DIC)	54
4.2	Discussão geral sobre os resultados experimentais obtidos das seis formas de aplicação de carga	67
5	Resultados numéricos	71
5.1	Aplicação direta de carga	75
5.2	Aplicação de carga com o uso de mordentes de aço	87

6	Conclusões e sugestões	94
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	95
7	Referências Bibliográficas	Erro! Indicador não definido.
	ANEXO A	100
	ANEXO B	101
	ANEXO C	104

Lista de figuras

Figura 2.1 - Ensaio brasileiro proposto por Carneiro (1943) e Akazawa (1943) (a) Esquema do ensaio, onde as cargas P são aplicadas diametralmente opostas na direção vertical, levando ao surgimento de tensões de tração na direção horizontal que eventualmente levam à ruptura do material. (b) Ensaio de compressão diametral de um rolo de concreto, realizado pela Divisão de Materiais de Construção, na década de 1940.	24
Figura 2.2 - Representação esquemática da solução analítica por Lapwood et al. (2007). As cargas são pontuais aplicadas diametralmente opostas e pode-se calcular as tensões em qualquer ponto do corpo de prova.	25
Figura 2.3 - Representação esquemática para as soluções analíticas de Hondros (1959). A carga é distribuída sobre um arco finito aplicada diametralmente oposta e pode-se calcular as tensões em qualquer ponto ao longo do eixo y .	26
Figura 2.4 - Representação esquemática para as soluções analíticas de Hondros (1959). A carga é distribuída sobre um arco finito aplicada diametralmente oposta e pode-se calcular as tensões em qualquer ponto na seção transversal do corpo de prova.	27
Figura 2.5 - Um exemplo de ensaio com ripas de madeira para distribuição da tensão conforme a norma brasileira NBR 7222 (ABNT, 2011). Onde H e B são a altura e largura da ripa de madeira, respectivamente, e D o diâmetro do disco.	30
Figura 2.6 - Exemplo de um ensaio brasileiro com a utilização de mordentes de aço.	31
Figura 3.1 - Moldes em repouso de 24hrs.	39
Figura 3.2 - Corte do corpo de prova (a) visão geral da máquina AROTEC (b) posicionamento do corpo de prova na máquina AROTEC para ser cortado.	39
Figura 3.3 - Confecção dos corpos de prova (a) marcação dos cilindros para serem cortados em discos. (b) disco nomeado como CP 9T, disco do topo do corpo de prova 9.	40
Figura 3.4 - Setup do ensaio brasileiro (a) visão geral do ensaio (b) clip gage preso ao corpo de prova.	41
Figura 3.5 - Disco com as placas metálicas coladas, sendo em cinza o Plástico.	41
Figura 3.6 - Corpos de prova após a colagem das placas metálicas para o clip gage, curando por 15h.	42

Figura 3.7 - Esquema de correlação de imagens utilizado no programa GOM Correlate (a) Pixel não deformado. (b) Pixel deformado, com coordenadas atualizadas após deformação.	42
Figura 3.8 - Técnica da correlação digital de imagem (a) disco após as pinturas com as tintas spray. (b) Setup do ensaio brasileiro para captação das imagens para o DIC.	43
Figura 3.9 - Imagens do corpo de prova analisadas no programa GOM Correlate (a) padrão aceito pelo programa (b) padrão não aceito pelo programa.	44
Figura 3.10 - Corpo de prova com aplicação direta de carga (a) disco pronto para ser ensaiado (b) representação esquemática.	44
Figura 3.11 - Corpo de prova com aplicação de carga por meio de ripas de madeira (a) disco pronto para ser ensaiado (b) representação esquemática.	45
Figura 3.12 - Corpo de prova com aplicação de carga por meio de tiras de papelão (a) disco pronto para ser ensaiado (b) representação esquemática.	45
Figura 3.13 - Corpo de prova com aplicação de carga por meio mordentes de aço (a) disco pronto para ser ensaiado (b) representação esquemática.	46
Figura 3.14 - Corpo de prova com aplicação de carga por meio de barras de aço (a) disco pronto para ser ensaiado (b) representação esquemática.	47
Figura 3.15 - Tentativa de moldar o chanfro com serras metálicas.	48
Figura 3.16 - Corpo de prova com aplicação de carga sobre os chanfros (a) disco pronto para ser ensaiado (b) representação esquemática.	48
Figura 3.17 - Gráfico de uma curva característica de tensão versus deformação radial/horizontal dos ensaios de compressão uniaxial.	50
Figura 3.18 – Setup dos ensaios complementares realizados (a) ensaio de compressão uniaxial por controle radial. (b) ensaio na máquina controls.	51
Figura 4.1 - Gráfico tensão versus abertura do clip gage com aplicação de carga por meio de mordentes de aço.	52
Figura 4.2 - Gráfico tensão versus abertura do clip gage dos ensaios representativos de cada condição de aplicação de carga.	53
Figura 4.3 - Gráficos do corpo de prova característico com aplicação direta de carga (a) tensão versus tempo (b) tensão versus deformação horizontal.	55
Figura 4.4 - Campo de deformação horizontal obtidos através da análise do DIC da aplicação direta de carga (a) Foto 14, não é possível visualizar o surgimento da fissura. (b) Foto 110, sendo possível visualizar o início da formação da fissura.	56

- Figura 4.5 - Gráficos do corpo de prova característico com aplicação de carga por meio de ripas de madeira (a) tensão versus tempo (b) tensão versus deformação horizontal. 57
- Figura 4.6 - Campo de deformação horizontal obtidos através da análise do DIC da aplicação de carga por meio de ripas de madeira (a) Foto 20, sendo possível visualizar o início da fissura na parte inferior do disco (b) Foto 132, sendo possível visualizar a fissura se propagando. 58
- Figura 4.7 - Gráficos do corpo de prova característico com aplicação de carga por meio de tiras de papelão (a) tensão versus tempo (b) tensão versus deformação horizontal. 59
- Figura 4.8 - Campo de deformação horizontal obtidos através da análise do DIC da aplicação de carga por meio de tiras de papelão (a) Foto 16, sendo possível visualizar uma leve concentração de carga na parte inferior do disco (b) Foto 145 referente ao segundo pico, sendo possível visualizar a fissura surgindo na região central do disco. 60
- Figura 4.9 - Gráficos do corpo de prova característico com aplicação de carga por meio de mordentes de aço (a) tensão versus tempo (b) tensão versus deformação horizontal. 61
- Figura 4.10 - Campo de deformação horizontal obtidos através da análise do DIC da aplicação de carga por meio de mordentes de aço (a) Foto 20, não sendo possível visualizar o surgimento da fissura (b) Foto 175 referente ao segundo pico, sendo possível analisar que a fissura começou a propagação na região próxima a aplicação de carga, porém se propagou a partir do centro do disco de forma homogênea. 62
- Figura 4.11 - Fissuras obtidas no ensaio brasileiro com o uso de mordentes de aço (a) Face frontal do corpo de prova. (b) Face lateral do corpo de prova. Nota-se que há um leve esmagamento na zona de aplicação de carga e um surgimento de uma segunda fissura. 63
- Figura 4.12 - Gráficos do corpo de prova característico com aplicação de carga por meio de barras de aço (a) tensão versus tempo (b) tensão versus deformação horizontal. 63
- Figura 4.13 - Campo de deformação horizontal obtidos através da análise do DIC da aplicação de carga por meio de barras de aço (a) Foto 11, não sendo possível visualizar o surgimento da fissura (b) Foto 122, sendo possível visualizar a propagação da fissura partindo da zona superior do disco. 64
- Figura 4.14 - Fissuras do ensaio brasileiro com aplicação de carga por meio de barras de aço (a) Face frontal do corpo de prova. (b) Face lateral do corpo de prova. Nota-se que há um esmagamento na amostra onde estava apoiada à barra de aço. 65
- Figura 4.15 - Gráficos do corpo de prova característico com aplicação de carga sobre chanfros (a) tensão versus tempo (b) tensão versus deformação horizontal. 65

Figura 4.16 - Campo de deformação horizontal obtidos através da análise do DIC da aplicação de carga sobre chanfros (a) Foto 23, não sendo possível visualizar o surgimento da fissura (b) Foto 115, sendo possível visualizar o surgimento da fissura na região central do disco.	66
Figura 4.17 - Fissuras do ensaio brasileiro com aplicação de carga sobre chanfros (a) fissura originando a partir da ponta do chanfro, devido imperfeições no corte. (b) Fissura surgindo no centro do disco.	67
Figura 5.1 - Elemento de interface implementado na malha exceto em uma região delimitada as extremidades do disco (a) 0,5mm (b) 1,11mm (c) 3mm.	72
Figura 5.2 - Modelo constitutivo do elemento de interface empregado na análise numérica.	73
Figura 5.3 - Pontos médios utilizados para a leitura de abertura de fissura no modelo numérico.	75
Figura 5.4 - A malha do disco foi dividida nas bordas em 200 unidades, e na linha central em 90 unidades. A malha das chapas metálicas foi dividida em 40x5 unidades.	75
Figura 5.5 - Gráfico tensão versus abertura de fissura da condição de aplicação direta de carga com resultados experimentais e numéricos.	76
Figura 5.6 - Esquema de modelos das malhas menos refinada, intermediária e mais refinada, respectivamente.	77
Figura 5.7 - Gráfico tensão versus abertura de fissura da sensibilidade numérica da malha da condição de aplicação direta de carga.	77
Figura 5.8 - Gráfico tensão versus abertura de fissura da comparação entre elementos quadrangulares e triangulares da condição de aplicação direta de carga.	78
Figura 5.9 - Modelagem numérica da condição de contorno de aplicação direta de carga com as chapas metálicas. Também está sendo evidenciado os apoios e a aplicação do deslocamento.	79
Figura 5.10 - Modelagem numérica da condição de contorno de aplicação direta de carga sem as chapas metálicas. Também está sendo evidenciado os apoios e a aplicação do deslocamento.	79
Figura 5.11 - Comparação do resultado numérico entre o modelo com chapas metálicas e sem chapas metálicas.	80
Figura 5.12 - Crescimento da fissura na condição de aplicação direta de carga com chapas metálicas, com abertura de fissuras de (a) 0,0025mm, (b) 0,0027mm, (c) 0,0029mm, (d) 0,0032mm e (e) 0,025mm, respectivamente.	81
Figura 5.13 - Crescimento da fissura na condição de aplicação direta de carga sem chapas metálicas, com abertura de fissuras de (a)	

0,0025mm, (b) 0,0027mm, (c) 0,0029mm, (d) 0,0031mm e (e) 0,0215mm, respectivamente.	81
Figura 5.14 - Tensão horizontal com aplicação direta de carga com chapas metálicas no momento de abertura de fissura (a) 0,0003mm (b) 0,0013mm (c) 0,0018mm (d) 0,0023mm (e) 0,0027mm (f) 0,0037mm (g) 0,033mm.	84
Figura 5.15 - Tensão horizontal com aplicação direta de carga sem chapas metálicas no momento de abertura de fissura (a) 0,00032mm (b) 0,0014mm (c) 0,0018mm (d) 0,0023mm (e) 0,0027mm (f) 0,0034mm (g) 0,0293mm.	86
Figura 5.16 - Evolução do dano ao longo do diâmetro do disco com aplicação direta de carga com chapas metálicas.	87
Figura 5.17 - Evolução do dano ao longo do diâmetro do disco com aplicação direta de carga sem chapas metálicas.	87
Figura 5.18 - A malha do disco foi dividida nas bordas em 200, e na linha central em 90. A malha das garras de aço foi dividida em 40 partes no arco em contato com o disco.	88
Figura 5.19 - Gráfico tensão versus abertura de fissura da comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e numericamente da condição de aplicação de carga com o uso de mordentes de aço.	88
Figura 5.20 - Gráfico tensão versus Abertura de fissura da sensibilidade da malha com aplicação de carga por meio de mordentes de aço.	89
Figura 5.21 - Gráfico tensão versus abertura de fissura da comparação entre malhas com elementos quadrangulares e triangulares da condição de aplicação com uso de mordentes de aço.	90
Figura 5.22 - Crescimento da fissura na condição de aplicação de carga com uso de mordentes de aço, nas aberturas de fissura de (a) 0,0011mm, (b) 0,0023mm, (c) 0,0027mm, (d) 0,0031mm, (e) 0,0032mm e (f) 0,0262mm, respectivamente.	90
Figura 5.23 - Tensão horizontal com aplicação de carga por meio de mordentes de aço no momento de abertura de fissura (a) 0,0012mm (b) 0,0016mm (c) 0,0021mm (d) 0,0027mm (e) 0,0031mm (f) 0,0074mm (g) 0,03mm.	92
Figura 5.24 - Evolução do dano ao longo do diâmetro do disco com aplicação de carga através de mordentes de aço.	93
Figura 0.1 - Curvas experimentais de tensão x abertura do clip gage de todos os ensaios realizados das seis formas de aplicação de carga (a) aplicação direta (b) por meio de ripas de madeira (c) por meio de tiras de papelão (d) com uso de mordentes de aço (e) por meio de barras de aço (f) sobre chanfros.	103
Figura 0.1 - Fissuras obtidas pelo ensaio brasileiro (a) por meio de aplicação direta de carga (b) com aplicação de carga por meio de ripas de madeira (c) com aplicação de carga por meio de tiras de papelão.	104

Lista de tabelas

Tabela 4.1 - Resultados de resistência à tração de todas as condições de aplicação de carga.	53
Tabela 4.2 - Valores de carga de pico de todas as condições de aplicação de carga.	54
Tabela 4.3 - Resultados analíticos e experimentais da resistência à tração de cinco configurações de aplicação de carga.	68
Tabela 4.4 - Resultado analítico e experimental da resistência à tração com aplicação de carga sobre chanfros.	68
Tabela 4.5 - Avaliação referente a montagem, execução e resultados das seis configurações de aplicação de carga do ensaio brasileiro.	69
Tabela 5.1 - Valores analíticos, experimentais e numéricos da resistência à tração das amostras.	93
Tabela 0.1 - Resultados dos ensaios de compressão realizados na máquina Controls.	100
Tabela 0.2 - Resultados dos ensaios de compressão realizados em diferentes horários do terceiro dia de cura.	100

*Só se pode alcançar um grande êxito
quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.*

Friedrich Nietzsche

1

Introdução

1.1 Motivação

A análise das propriedades mecânicas do concreto é de suma importância para o ramo da engenharia civil, uma vez que possibilita o dimensionamento seguro dos elementos estruturais, assim como uma previsão do comportamento do material quando submetidos a diferentes tipos de solicitação. Uma importante propriedade do material é a resistência à tração, pois é ela que influencia diretamente no surgimento e propagação de fissuras. O seu não conhecimento pode gerar problemas nas estruturas afetando de forma negativa a sua durabilidade e segurança.

Para a caracterização da resistência à tração, um dos métodos mais comumente utilizados é o ensaio brasileiro, que consiste na obtenção indireta da resistência à tração da amostra por meio de carregamentos aplicados diametralmente opostos ao longo do eixo do corpo de prova, até que se atinja a ruptura. Este experimento também é conhecido como ensaio de tração indireta ou ensaio de compressão diametral.

O pioneiro no ensaio brasileiro foi o professor Lobo Carneiro em 1943, que realizou ensaios para obter a resistência à tração. Com o passar de 76 anos, muitos pesquisadores discutiram a respeito do ensaio brasileiro com foco na distribuição das tensões de tração no eixo diametral do disco, sobre a precisão dos resultados obtidos e debateram a respeito da eficácia e reprodutibilidade dos ensaios brasileiros. Muitos estudiosos já realizaram pesquisas envolvendo a implementação de peças metálicas, como mordentes e arcos de aço com diferentes angulações, o uso de tiras de madeiras, com o intuito de avaliar como o seu uso implica no resultado da resistência a tração, na distribuição das tensões de tração e a respeito do surgimento e propagação das fissuras nos corpos de prova.

O método que é mais indicado para se obter a resistência à tração do material, é o de tração direta. Entretanto, esse ensaio não é frequentemente realizado devido às dificuldades de execução do ensaio associadas à aplicação de uma carga pura de tensão no plano da amostra, o alinhamento adequado entre a máquina e o corpo de

prova e a aplicação de carga nas garras e suportes. O ensaio de compressão diametral é simples de ser executado e fornece resultados mais uniformes e homogêneos do que os da tração direta, somado ao fato de que este procedimento é praticamente o mesmo desde sua criação pelo professor Lobo Carneiro, em 1943.

Com o grande avanço da tecnologia pôde-se obter um vasto leque de recursos computacionais como ferramentas de apoio nas diversas áreas da engenharia, ajudando assim a comparar e validar os resultados dos ensaios experimentais com a implementação de modelos numéricos feitos computacionalmente. A confiabilidade dos modelos numéricos depende diretamente da boa execução dos ensaios experimentais que apresentem dados compatíveis e coerentes com os fornecidos pelas simulações.

1.2 Objetivo

Os objetivos desse trabalho incluem:

- Analisar e comparar os resultados de resistência à tração obtidos através do ensaio brasileiro realizado de seis maneiras distintas de aplicação de carga: diretamente no disco, por meio de ripas de madeira, por meio de tiras de papelão, com o uso de mordentes de aço, por meio de barras de aço e a sobre cortes nas extremidades diametrais disco, denominado de chanfros.

- Realizar um estudo sobre os ensaios através do programa GOM Correlate, com o intuito de visualizar o surgimento das fissuras nas amostras e analisar a diferença entre as seis formas de aplicação de carga.

- Realizar uma simulação numérica de elementos finitos com as propriedades mecânicas do material ensaiado experimentalmente a fim de comparar com os resultados experimentais.

1.3 Organização do trabalho

O capítulo 1 aborda a introdução e os objetivos da dissertação.

O capítulo 2 traz a revisão bibliográfica contendo um breve histórico a respeito do ensaio brasileiro, apresenta as soluções analíticas desenvolvidas por alguns autores, aborda a resistência à tração segundo algumas normas, cita trabalhos realizados por vários autores no âmbito experimental e numérico e traz uma discussão a respeito do ensaio brasileiro.

O capítulo 3 apresenta os materiais utilizados nos ensaios, tal como as suas modelagens e preparações, aborda a metodologia do ensaio brasileiro para cada uma das seis condições de contorno e também descreve um ensaio de compressão uniaxial desenvolvido para a obtenção das propriedades da amostra, tal como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

O capítulo 4 demonstra os ensaios experimentais realizados, assim como os resultados obtidos, de cada uma das seis condições de contorno. Traz também uma comparação dos resultados experimentais de todas as condições de contorno.

O capítulo 5 demonstra a simulação numérica realizada pelo programa Abaqus em duas condições de contorno, a aplicação direta de carga e a com uso de mordentes de aço. Traz os resultados numéricos obtidos pelas modelagens e apresenta algumas comparações numéricas.

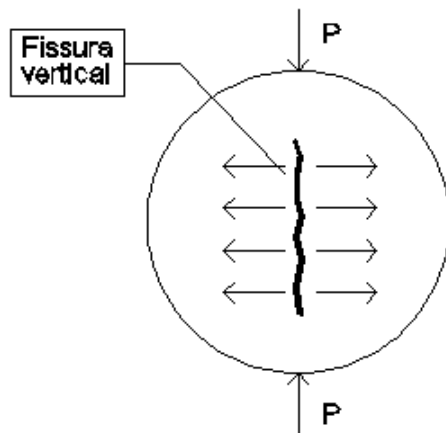
O capítulo 6 traz as conclusões do presente trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Histórico

Na década de 1940, um problema desafiador de engenharia inspirou o professor Lobo Carneiro a desenvolver um novo método para obter a resistência a tração de materiais frágeis: uma igreja barroca estava no meio de onde seria construída uma nova avenida no Rio de Janeiro. Para impedir a demolição da igreja, o professor Lobo Carneiro teve uma ideia de transportá-la sobre cilindros de concreto, pois a construção de aço nessa época estava voltada para a Segunda Guerra Mundial. Carneiro (1943) elaborou um método a fim de estimar a resistência à tração de materiais frágeis tais como rochas e concretos, conhecido como *Brazilian test* – ensaio brasileiro. O teste, também designado como ensaio de tração indireta ou compressão diametral, baseia-se na aplicação de forças de compressão em dois pontos diametralmente opostos em um cilindro ou disco, provocando assim uma tensão uniforme de tração normal à aplicação da carga, como mostrado na Figura 2.1 (a). Esta tensão de tração, quando maior do que a resistência à tração do material, leva à fissuração e ruptura do corpo de prova, conduzindo, então, a parti-lo em duas metades. A Figura 2.1 (b) mostra um ensaio realizado pelo professor Lobo Carneiro na década de 40 em um cilindro de concreto, e o sistema de controle do ensaio foi o mais simples, o controle por força, que ao atingir a carga de pico o corpo de prova rompe de maneira frágil e o ensaio é finalizado.

Separadamente, Akazawa (1943) no Japão também desenvolveu um método similar de ensaio por compressão diametral na mesma época que o professor Lobo Carneiro, cerca de dois meses depois, sem terem trocado quaisquer tipos de informações, (Fairbairn 2002). Porém, em um congresso na França em 1947, o professor Carneiro apresentou o seu método para obtenção de resistência à tração de materiais frágeis, e o ensaio ficou conhecido como ensaio brasileiro.



(a)



(b)

Figura 2.1 - Ensaio brasileiro proposto por Lobo Carneiro (a) Esquema do ensaio, onde as cargas P são aplicadas diametralmente opostas na direção vertical, levando ao surgimento de tensões de tração na direção horizontal que eventualmente levam à ruptura do material. (b) Ensaio de compressão diametral de um rolô de concreto, realizado pela Divisão de Materiais de Construção, na década de 1940, Instituto Nacional de Tecnologia (2005).

2.2 Soluções Analíticas

Ao longo do tempo, diversos autores propuseram soluções analíticas para descrever as distribuições de tensões que ocorrem durante o ensaio brasileiro. Lapwood et al. (2007) desenvolveram soluções para o caso de aplicação de cargas pontuais diametralmente opostas em material elástico e isotrópico, apresentadas nas equações (2.1), (2.2) e (2.3). Elas apresentam tensões calculadas em qualquer ponto z da seção transversal do corpo de prova, como mostra a Figura 2.2. Vale destacar que as forças estão sendo aplicadas no eixo x , na horizontal.

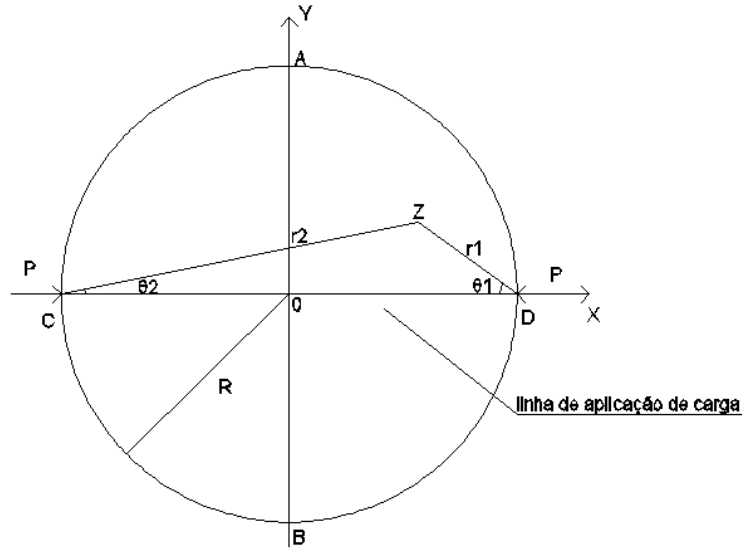


Figura 2.2 - Representação esquemática da solução analítica por Lapwood et al. (2007). As cargas são pontuais aplicadas diametralmente opostas e pode-se calcular as tensões em qualquer ponto do corpo de prova.

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi t} \left(\frac{\cos^3 \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^3 \theta_2}{r_2} \right) - \frac{P}{\pi R t} \quad (2.1)$$

$$\sigma_y = \frac{P}{\pi t} \left(\frac{\sin^2 \theta_1 \cos \theta_1}{r_1} + \frac{\sin^2 \theta_2 \cos \theta_2}{r_2} \right) - \frac{P}{\pi R t} \quad (2.2)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{2P}{\pi t} \left(\frac{\sin \theta_1 \cos^2 \theta_1}{r_1} - \frac{\sin \theta_2 \cos^2 \theta_2}{r_2} \right) \quad (2.3)$$

Onde σ_x é a tensão na direção x, σ_y é a tensão na direção y, τ_{xy} é a tensão de cisalhamento, θ_1 é o ângulo entre a direção de carregamento e a linha z_1 , θ_2 é o ângulo entre a direção de carregamento e a linha z_2 e r_1 , r_2 são as distâncias de dois pontos de carregamento para o ponto z, respectivamente, t é a espessura e o R é o raio do disco.

Hondros (1959) e Gutiérrez et al.(2018) obtiveram soluções analíticas para as distribuições de tensões ao longo do eixo y, no caso de carregamento distribuído sobre um arco finito, como mostra o esquema da Figura 2.3. As equações (2.4) e (2.5) são válidas para estado plano de tensões, no caso de discos, e de deformações, no caso de cilindros e assumem que o material seja homogêneo, isotrópico e linear elástico.

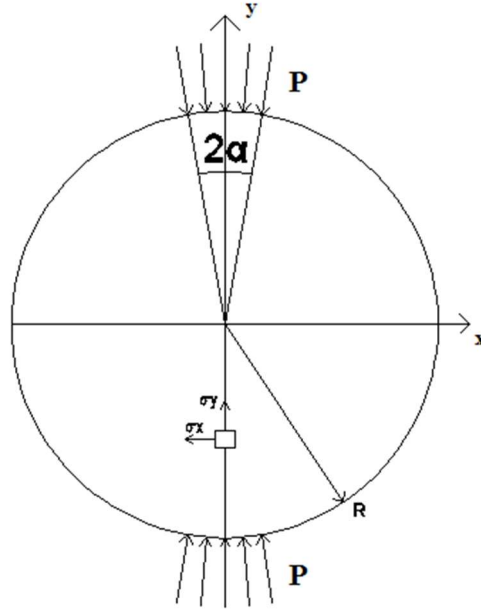


Figura 2.3 - Representação esquemática para as soluções analíticas de Hondros (1959). A carga é distribuída sobre um arco finito aplicada diametralmente oposta e pode-se calcular as tensões em qualquer ponto ao longo do eixo y.

$$\sigma_x = \frac{P}{\pi R t \alpha} \left\{ \frac{\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \sin 2\alpha}{1 - 2 \left(\frac{r}{R}\right)^2 \cos 2\alpha + \left(\frac{r}{R}\right)^4} - \tan^{-1} \left[\frac{1 + \left(\frac{r}{R}\right)^2}{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} \tan \alpha \right] \right\} \quad (2.4)$$

$$\sigma_y = -\frac{P}{\pi R t \alpha} \left\{ \frac{\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \sin 2\alpha}{1 - 2 \left(\frac{r}{R}\right)^2 \cos 2\alpha + \left(\frac{r}{R}\right)^4} + \tan^{-1} \left[\frac{1 + \left(\frac{r}{R}\right)^2}{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} \tan \alpha \right] \right\} \quad (2.5)$$

Onde P é a carga radial aplicada sobre uma pequena faixa do disco, R é o raio do disco, r é a distância do centro do disco, t a espessura e 2α é o ângulo dos arcos de carga distribuídos uniformemente.

Hondros (1959) também desenvolveu soluções para as distribuições de tensões em qualquer ponto da seção transversal de um corpo de prova submetido a carregamentos distribuídos aplicados sobre arcos finito diametralmente opostos, conforme mostra a Figura 2.4. O autor obteve os campos de tensão completos utilizando a técnica de expansão em série, conforme mostram as equações (2.6) a (2.8).

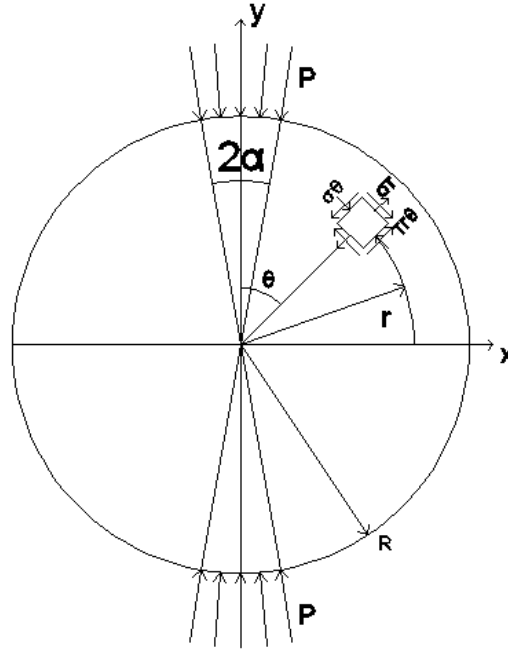


Figura 2.4 - Representação esquemática para as soluções analíticas de Hondros (1959). A carga é distribuída sobre um arco finito aplicada diametralmente oposta e pode-se calcular as tensões em qualquer ponto na seção transversal do corpo de prova.

$$\sigma_r = -\frac{2P}{\pi} \left\{ \alpha + \sum_{n=1}^{\infty} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{n} \right) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \left(\frac{r}{R} \right)^{2n-2} \operatorname{sen} 2n\alpha \cos 2n\theta \right\} \quad (2.6)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{2P}{\pi} \left\{ \alpha - \sum_{n=1}^{\infty} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{n} \right) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \left(\frac{r}{R} \right)^{2n-2} \operatorname{sen} 2n\alpha \cos 2n\theta \right\} \quad (2.7)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{2P}{\pi} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \left(\frac{r}{R} \right)^{2n-2} \operatorname{sen} 2n\alpha \cos 2n\theta \right\} \quad (2.8)$$

Onde P é a pressão aplicada, R é o raio do disco, r e θ são as coordenadas polares de um ponto qualquer e α é o ângulo central da carga distribuída, conforme a Figura 2.4.

Hung and Ma (2003) deram continuidade ao trabalho de Hondros a fim de obter uma solução de forma explícita com uma expressão mais simples, tendo como base o esquema representado na Figura 2.4. Ma e Hung obtiveram as equações (2.9) a (2.12) derivando a solução analítica que Hondros (1959) havia proposto. Partindo do mesmo princípio deste autor, o material é homogêneo, isotrópico, linear elástico e as cargas são distribuídas aplicadas diametralmente opostas em uma pequena área.

$$\begin{aligned}\sigma_r(r, \theta) = & -\frac{P}{\pi} \left\{ \frac{(1 - P^2)\sin 2(\alpha + \theta)}{P^4 + 1 - 2P^2 \cos 2(\alpha + \theta)} \right. \\ & + \frac{(1 - P^2)\sin 2(\alpha - \theta)}{P^4 + 1 - 2P^2 \cos 2(\alpha - \theta)} \\ & + \tan^{-1} \left[\frac{1 + P^2}{1 - P^2} \tan(\alpha + \theta) \right] \\ & \left. + \tan^{-1} \left[\frac{1 + P^2}{1 - P^2} \tan(\alpha - \theta) \right] + \Phi \right\} \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}\end{aligned}\quad (2.9)$$

$$\begin{aligned}\sigma_\theta(r, \theta) = & -\frac{P}{\pi} \left\{ -\frac{(1 - P^2)\sin 2(\alpha + \theta)}{P^4 + 1 - 2P^2 \cos 2(\alpha + \theta)} \right. \\ & - \frac{(1 - P^2)\sin 2(\alpha - \theta)}{P^4 + 1 - 2P^2 \cos 2(\alpha - \theta)} \\ & + \tan^{-1} \left[\frac{1 + P^2}{1 - P^2} \tan(\alpha + \theta) \right] \\ & \left. + \tan^{-1} \left[\frac{1 + P^2}{1 - P^2} \tan(\alpha - \theta) \right] + \Phi \right\} \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}\end{aligned}\quad (2.10)$$

$$\begin{aligned}\tau_{r\theta}(r, \theta) = & \frac{P}{\pi} \left\{ \frac{(1 - P^2)[-P^2 + \cos 2(\alpha - \theta)]}{P^4 + 1 - 2P^2 \cos 2(\alpha - \theta)} \right. \\ & \left. - \frac{(1 - P^2)[-P^2 + \cos 2(\alpha + \theta)]}{P^4 + 1 - 2P^2 \cos 2(\alpha + \theta)} \right\} \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}\end{aligned}\quad (2.11)$$

$$\Phi = \left\{ 0 \text{ para } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} - \alpha ; \pi \text{ para } \frac{\pi}{2} - \alpha \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right\} \quad (2.12)$$

Onde σ_r é a tensão normal ao longo da coordenada r , σ_θ é a tensão normal ao longo da coordenada θ , $\tau_{r\theta}$ é a tensão cisalhante em relação a $r\theta$, P é a carga distribuída aplicada uniformemente como pressão, 2α é o ângulo do arco, R é o raio do disco, e $\rho = r/R$.

Em geral, essas soluções analíticas adotam a hipótese de Griffith para materiais frágeis como critério de ruptura, Fairhurst (1964), Gutiérrez-Moizant et al. (2018) e Li and Wong (2013). A hipótese estabelece que:

Se,

$$(i) \quad 3\sigma_1 + \sigma_3 \geq 0,$$

Então, a ruptura ocorre quando $\sigma_1 = K$ (resistência à tração do corpo de prova). E:

Se,

$$(ii) \quad 3\sigma_1 + \sigma_3 < 0,$$

Então, a ruptura ocorre quando $(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 8K(\sigma_1 + \sigma_3) = 0$. Onde σ_1 e σ_3 são a máxima e mínima tensão principal. Desta forma, de acordo com Griffith,

para um ensaio brasileiro válido, o centro do disco é o ponto no qual a condição (i) é atendida e, portanto, é onde a fissura deve iniciar.

Desta forma, no ponto central, as tensões horizontal e vertical são dadas pelas equações (2.13) e (2.14), respectivamente, conforme Li and Wong (2013):

$$\sigma_x = \frac{P}{\pi R t} \left\{ \frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right\} \approx \frac{P}{\pi R t} \approx \frac{2P}{\pi D t} \quad (2.13)$$

$$\sigma_y = -\frac{P}{\pi R t} \left\{ \frac{\sin 2\alpha}{\alpha} + 1 \right\} \approx -\frac{3P}{\pi R t} \approx -\frac{6P}{\pi D t} \quad (2.14)$$

2.3 Resistência à tração segundo as normas

O ensaio de tração direta em materiais frágeis é de difícil execução. Desta forma, diferentes associações recomendam a execução do ensaio brasileiro como uma forma indireta de estimar a resistência à tração de tais materiais. As normas estudadas no presente trabalho, a NBR 7222 (ABNT, 2011), a C39 (ASTM, 2012), a D3967 (ASTM, 2008) e a ISRM (1978), partem do mesmo princípio; o corpo de prova ensaiado é um cilindro (ou disco) com carregamento diametralmente oposto e a equação (2.15) é utilizada (baseada na equação (2.13)) para a obtenção da resistência à tração.

$$\sigma_t = \frac{2P_c}{\pi D t} \quad (2.15)$$

Onde P_c é a carga crítica (kN), t e D são a espessura (mm) e o diâmetro (mm) do disco, respectivamente.

Entretanto, essas normas tratam do ensaio brasileiro em materiais diferentes. A NBR 7222 (ABNT, 2011) descreve ensaios em cilindros de concretos ou argamassas enquanto que as normas D3967 (ASTM, 2008) e a ISRM (1978) referem-se a ensaios em discos de rochas. A diferença do tipo de corpo de prova para os diferentes materiais pode estar relacionada com o tamanho dos grãos, uma vez que concretos podem possuir agregados de diâmetros maiores do que os grãos presentes em rochas. Além disso, em ambiente de obra, é mais prático realizar o ensaio em corpos de provas cilíndricos, uma vez que cortá-los em discos seria mais trabalhoso.

A execução do ensaio brasileiro em concretos e argamassas, segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011), consiste basicamente na compressão ao longo de duas linhas diametralmente opostas em uma face plana de um cilindro. A norma prescreve o método para determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

Na Figura 2.5 é mostrado um esquema de execução de um ensaio de compressão diametral de um cilindro com a colocação de ripas de madeiras posicionadas diametralmente opostas.

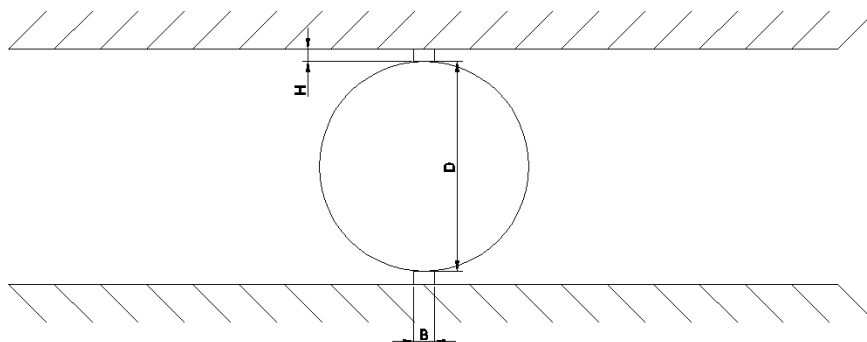


Figura 2.5 - Um exemplo de ensaio com ripas de madeira para distribuição da tensão conforme a norma brasileira NBR 7222 (ABNT, 2011). Onde H e B são a altura e largura da ripa de madeira, respectivamente, e D o diâmetro do disco.

Para a realização do ensaio brasileiro em rochas, segundo as normas D3967 (ASTM, 2008) e ISRM (1978), o corpo de prova é um disco que deve apresentar a relação espessura / diâmetro (t / D) entre 0,2 e 0,75. De acordo com a D3967 o diâmetro da amostra deve ser pelo menos 10 vezes maior que o maior grão presente no disco.

As normas ISRM (1978) e D3967 (ASTM, 2008) sugerem o uso de mordentes de aço afim de obter uma melhor distribuição de tensões ao longo da seção transversal do disco e uma possível centralização da fissura. A ASTM prescreve que o mordente de aço tenha arco de contato com o corpo de prova de até 15 graus ou que a largura de contato seja menor que $D/6$. Já a ISRM (1978) sugere que o ângulo de contato do mordente de aço com o corpo de prova seja no máximo 10 graus. Quando os mordentes de aço são utilizados, a resistência à tração é calculada utilizando a equação (2.16). A Figura 2.6 mostra um exemplo de mordente de aço utilizado em um ensaio brasileiro.

$$\sigma_t = 1,272 \frac{P_c}{\pi t D} \quad (2.16)$$



Figura 2.6 - Exemplo de um ensaio brasileiro com a utilização de mordentes de aço.

Por outro lado, a norma D3967 sugere outras formas de aplicação de carga, além do uso dos mordentes de aço. Entre eles a norma sugere a aplicação direta da carga, a partir do contato direto do corpo de prova com as placas planas de apoio. Além disso, ela descreve a possibilidade da utilização de elementos de distribuição da carga na região de contato com o disco, os quais podem ser constituídos de tiras de madeira ou papelão. No entanto, a D3967 destaca que, apesar dos resultados obtidos com o uso dos mordentes ou com o uso das tiras de apoio não diferirem significativamente entre si, diferenças podem ser encontradas quando esses resultados são comparados com os de aplicação direta de carga.

2.4 Estudo das condições de contorno do ensaio brasileiro

No estudo de Erarslan and Williams (2012), foram utilizados diferentes arcos de contato com o corpo de prova afim de observar a diferença entre os resultados. O carregamento foi aplicado por meio de uma coluna de carregamento hidráulico de alta pressão, com taxas de carregamento de 200 N/s sugeridas por ISRM (1978). Um dos principais objetivos deste estudo foi analisar a resistência à tração, a distribuição de tensão e as fissuras das amostras de disco sobre carregamento com arcos de diferentes ângulos, em comparação com os resultados do ensaio brasileiro com o uso de mordentes de aço. Tal comparação foi realizada experimentalmente, numericamente e analiticamente, para testar se com o uso de arcos com diferentes angulações amenizariam as imperfeições geradas com o uso do mordente de aço padrão. As angulações dos arcos utilizadas foram de 15, 20 e 30 graus. O disco com o material de tufo, quando ensaiado com os mordentes de aço apresentou fissuras

trágicas. Os ensaios com arcos de 15° apresentaram uma fissura que se afastou um pouco do eixo vertical, com surgimento de uma fissura secundária. Os ensaios utilizando arcos de 20° apresentaram uma única fissura vertical central, e os testes com arcos de 30° apresentaram uma fissura central vertical pouco propagada. Os resultados dos testes realizados nas amostras de arenito mostraram que as fissuras geradas com o uso dos mordentes de aço não causaram falhas abruptas, devido ao arenito ser mais poroso e menos frágil quando comparado com o tufo e granito. Porém, os ensaios com diferentes angulações produziram fissuras nas amostras de granito muito parecidas com as fissuras obtidas nas amostras de tufo. Entretanto, a falha gerada com o arco de 30 graus originou-se quase no centro do disco, em comparação com a fissura gerada pelo material tufo.

Li and Wong (2013) realizaram uma análise linear elástica por meio de uma modelagem numérica com a plataforma FLAC3D a fim de obter as distribuições de tensão e de deformação no ensaio brasileiro, assim como a propagação das fissuras. A máxima concentração de tensão e a máxima concentração de compressão foram observadas ocorrendo 5mm distante dos pontos de aplicação de carga ao longo do eixo comprimido, ao invés de ocorrerem no centro do disco, como esperado de acordo com a teoria de Griffith. Os autores concluíram que o ponto de início da fissura em discos rochosos no ensaio brasileiro acontece próximo aos pontos de aplicação de carga.

No estudo de Es-Saheb, Albedah and Benyahia (2011) foi realizado uma análise numérica de um disco cilíndrico sobre uma carga de compressão aplicada diametralmente. Devido as deformações se concentrarem nos pontos de aplicação de carga, as condições de carregamento mudaram de cargas concentradas para cargas distribuídas. Os ensaios foram realizados em elementos finitos 2D que apresentaram um disco de 100mm de diâmetro e 10mm de espessura. A carga aplicada foi concentrada em um ponto com valor de 1000 N e distribuída sobre uma pequena área. No modelo foi feito $\frac{1}{4}$ do disco, uma vez que se levou em conta a simetria, ou seja, usou-se então a metade da força. Com a carga concentrada, os ensaios não geraram bons resultados, pois a ruptura apareceu na região de aplicação de carga. Entretanto, com aplicações de cargas distribuídas em áreas curvas e em áreas planas percebeu-se que a fissura se originava mais próximo ao centro.

No estudo de Carmona and Aguado (2012) foi abordado que o método que seria mais adequado para obter a resistência à tração do material é o de tração direta. Porém, esse ensaio não é frequentemente utilizado devido ao ensaio ser de difícil

execução. Então, os autores realizaram ensaios de compressão diametral com o objetivo de se obter uma propagação controlada da fissura ao atingir a máxima resistência de tração do material utilizando um controle chamado *closed-loop*. Este tipo de controle consiste em controlar a aplicação de carga por meio de uma outra leitura do sistema. Nesse caso, a carga foi aplicada tal que a taxa de abertura de fissura (esta medida por um *clip gage*) fosse constante. Esse controle tem por objetivo registrar o comportamento pós-fissuração da amostra. A carga é aplicada pontualmente sobre ripas de madeira, com dimensões adequadas para um disco de 150mm. As curvas obtidas após a carga de pico tiveram um amolecimento e carga constante, um artefato devido ao sistema ser controlado pelo *clip gage* o que impediu que a fissura abrisse muito. Os resultados mostraram que a maioria dos parâmetros experimentais do modelo proposto depende das condições do ensaio: material testado, forma e tamanho da amostra.

2.5 Modelos numéricos desenvolvidos para simular os ensaios brasileiros

Li and Wong (2013) desenvolveram um modelo numérico 3D de elementos finitos com o auxílio do *software* comercial FLAC3D para analisar as distribuições de tensão e deformação de um disco. O material é considerado homogêneo e linear elástico. Os discos estudados apresentam 50 mm de diâmetro e 25 mm de espessura. As malhas utilizadas no modelo foram construídas usando o *software* FEM ANSYS e depois importado para FLAC3D. As propriedades do material atribuídas à amostra são módulo de elasticidade de 50 GPa, coeficiente de Poisson de 0,24 e densidade de 2,70 g/cm³. Uma carga distribuída vertical é aplicada ao corpo de prova ao longo da linha diametral incrementalmente com as etapas de cálculo. A carga é aplicada uniformemente na vertical a cada ponto da grade na faixa de carregamento de 0,2 N por passo com um total de 2000 passos, sendo mantida constante até chegar a um equilíbrio mecânico no modelo. Conclui-se que a máxima tensão de compressão e de tração ocorrem cerca de 5mm distante dos dois pontos de aplicação de carga, ao invés de no centro do disco como esperado.

Lin et al (2014), a fim de explorarem ainda mais a posição exata da iniciação da fissura e seu modo de falha, usaram o *software* FLAC3D para cálculo numérico. Uma vez que os autores consideraram a modelagem de FLAC3D complexa, o *software* de elementos finitos ANSYS foi usado para construir uma distribuição mais uniforme de elementos com homogeneidade na malha. O modelo construído

apresenta 50 mm de diâmetro e 20mm de espessura, em uma modelagem 3D com elementos finitos. As propriedades de um granito foram utilizadas para definir o material do disco e o contato entre o corpo de prova e a aplicação da carga é considerado suave. As cargas são aplicadas no disco ao longo do eixo vertical simetricamente e o valor da carga é fixado em 0,8 kN/mm. O valor da força vertical é igual a 16kN. O material é definido como elástico e isotrópico, e seu módulo de elasticidade é de 43,9 GPa, enquanto o módulo de cisalhamento é de 30,2 GPa. Os autores concluíram que a origem da fissura é devido a falha de tensão, onde há a máxima concentração de tração.

As soluções numéricas analisadas por Gutiérrez-Moizant et al. (2018) foram realizadas no programa Abaqus com elementos finitos e modelos de deformação em plano 2D, por ser mais ágil no processamento dos dados. O estudo visou uma comparação nos resultados obtidos numericamente entre o uso de mordentes de aço e arcos com angulações variadas. O disco apresenta 53,6mm de diâmetro, 27mm de espessura, módulo de elasticidade de 30 GPa e coeficiente de Poisson de 0,31 como suas propriedades geométricas e mecânicas utilizadas nos modelos numéricos inicialmente analisados. Um dispositivo de carregamento foi modelado para carga e transmitida através do contato do dispositivo com o disco (contato superfície-superfície), primeiro sem atrito e mais tarde com coeficientes de atrito de 0,25, 0,50 e 0,75, conforme Pallet et al. (2003). Uma vez que o dispositivo de carga é de aço, apresenta maior rigidez que o disco, então foi modelado com um módulo de elasticidade de 210 GPa. No modelo, a carga é aplicada em um sistema com direção radial, como na expressão analítica de Hondros (1959a). As cargas foram aplicadas por meio de uma pressão uniforme de 35 MPa. Um deslocamento restrito foi imposto na área de contato da parte inferior do arco para identificar a orientação e magnitude da reação das forças no contato. Conclui-se que com a análise numérica realizada com mordentes de aço pôde-se afirmar que a faixa permitida de ângulo de contato com o disco recomendada pelo clássico ensaio brasileiro proposto pela ISRM (1978) não coincide com o critério de falha de Griffith, uma vez que foi demonstrado que a máxima concentração de tensão ocorre perto da zona de aplicação de carga. Os resultados numéricos feitos com os arcos de diferentes angulações mostraram que a probabilidade de o ponto de origem da fissura ser no centro do disco é maior quando a angulação do arco for igual ou maior que 20 graus.

Uma série de análises 2D de elementos finitos foram realizadas por Erarslan and Williams (2012) para entenderem melhor a distribuição de tensões dentro de

uma amostra de disco sobre diferentes modos de carregamento indireto, como mordentes de aço, arcos de 15, 20 e 30 graus. As análises foram realizadas utilizando o software FRANC2D (*Fracture Analysis Code*). Na modelagem numérica, os discos são elásticos contínuos, isotrópicos e homogêneos. Com base nos resultados do teste utilizando o material tufo, foram adotados módulo de elasticidade de 22 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,24. A carga foi aplicada como uma pressão de tração de 83 MPa sobre a largura projetada da seção carregada do disco, utilizando o arco de 15° como condição de contorno. Em todas as simulações, a base do disco foi fixada em x e y, e a largura da seção carregada sobre os arcos de aço foi mantida constante. Para a simulação com mordentes de aço, a carga foi aplicada sobre uma largura de 1 mm, assumindo uma carga distribuída acima de $2\alpha = 2^\circ$. As simulações numéricas apontaram que a máxima concentração de tensão de tração ocorreu no centro do disco quando ele foi ensaiado com os mordentes de aço. Enquanto que a menor concentração de tensão de tração registrada ocorreu no centro do disco quando foi utilizado um arco de 15 graus.

Denneman, Kearsley and Visser (2011) analisaram ainda mais a condição de tensão nos experimentos. Uma modelagem numérica foi realizada usando o software comercial Abaqus. O comportamento de suavização da tensão pós-fissuração do material é simulado usando elemento coesivo por aproximação introduzido primeiramente para o concreto por Hillerborg, Modéer, and Petersson (1976). O material comporta-se em regime linear elástico até a tensão atingir a resistência à tração do material e uma fissura ser formada. Após o início da fissura, as tensões permanecem sendo transferidas pela superfície fissurada. Um valor de 0,005 mm foi utilizado para implementar uma fissura inicial para facilitar a rachadura. Apenas 1/4 do cilindro foi modelado, devido ao disco apresentar uma simetria. Modelou-se ripas de madeira entre a superfície do disco e as chapas metálicas de aplicação de carga. As propriedades do aço foram módulo de elasticidade de 210 GPa e coeficiente de Poisson de 0,25, e para a madeira, utilizou-se módulo de elasticidade de 5 GPa e coeficiente de Poisson de 0,3. Conclui-se que a simulação numérica desenvolvida nesse estudo é satisfatória para estimar um valor próximo da verdadeira resistência à tração do material.

2.6 Discussões a respeito do ensaio brasileiro

Muitos autores desenvolveram pesquisas com o objetivo de tentar melhorar a estimativa da resistência à tração do material. Utilizaram alguns métodos distintos

de aplicação e distribuição de carga, como o uso de arcos metálicos, ripas de madeira, ripas de papelão, barras de aço, mordentes de aço, ambos envolvendo o disco. Vários autores também desenvolveram modelos numéricos e utilizaram programas de correlação de imagens para melhor estudarem o início e a propagação das fissuras no ensaio brasileiro.

O uso de arcos metálicos para a realização do ensaio brasileiro foi primeiramente proposto por Jaeger and Hoskins (2012). Entretanto, no estudo de Mellor and Hawkes (1971) e Hudson, Brown, and Rummel (1972), foi demonstrado que essa condição de contorno do uso de arcos metálicos não gerava bons resultados, alegando que as pontas dos arcos penetram o disco e o surgimento da fissura no centro do disco não era garantida. Pesquisas realizadas por Fairhurst (1964), Satoh (2011) e Erarslan and Williams (2012) apontaram que com o uso do *jaws* proposto pela ISRM (1978) geraram-se fissuras na zona de aplicação de carga, o que inibiu a eficácia do teste. Por essa razão, na pesquisa de Erarslan and Williams (2012) os autores se propuseram a retomar a utilização dos arcos metálicos como condição de contorno para obter indiretamente a resistência à tração, alegando que conseguiriam melhores resultados se os ensaios fossem cuidadosamente realizados. Eles observaram que usando os arcos metálicos o ponto de contato era curvilíneo, diferente do contato de “linha de carga” dos mordentes de aço. Os autores observaram experimentalmente que a máxima resistência à tração e o início da fissura ocorrem no centro do disco, quando o contato do arco com o disco está na faixa entre $20^\circ \leq 2\alpha \leq 30^\circ$. Komurlu and Kesimal (2015) e García et al. (2017) comprovaram os resultados obtidos no estudo de Erarslan and Williams (2012).

A ruptura, segundo a teoria da elasticidade, é resultado de uma tensão de tração uniforme ao longo do plano vertical do corpo de prova, portanto, perpendicular ao eixo de carregamento, o que resultaria na fissura centralizada observada, baseado no critério de falha de Griffith. O início da fissura e sua propagação no ensaio brasileiro ainda é um grande enigma. Diferentes análises experimentais e numéricas estão sendo realizadas para tentar compreender melhor esse fenômeno.

Estudos de Wang et al. (2004), Yu (2005) e Yu and Xu (2006) mostraram que o início da fissura ocorrendo no centro dos corpos de prova era a garantia que o ensaio brasileiro fosse efetivo e preciso. Porém, o ponto exato da abertura de fissura não é claro. Muitos pesquisadores estudaram a posição da abertura de fissura no ensaio brasileiro usando vários métodos. Fairhurst (1964) abordou que a fissura

pode ocorrer distante do centro do disco com pequenos ângulos de contato no carregamento. Hudson et al. (1972) descobriram que a fissura geralmente inicia diretamente nos pontos de aplicação de carga se chapas de aço planas forem utilizadas para o carregamento do ensaio. Gong, Xibing, and Zhao (2010) debateram que em seus experimentos o início da fissura ocorria perto do centro do disco. Markides, Pazis, and Kourkoulis (2010) usaram método numérico para analisar a iniciação das fissuras, e concluíram que elas ocorriam perto dos pontos de aplicação de carga. Markides and Kourkoulis (2012) utilizaram métodos experimentais e numéricos para comprovar que o início da fissura ocorria cerca de $0.8R$ distante do centro do disco, onde R é o raio do disco. Li and Wong (2013) desenvolveram um modelo numérico e concluíram que a fissura se originava 5mm distante dos dois pontos de aplicação de carga, onde o disco apresentava 25mm de espessura.

O teste brasileiro, comparado com o teste de tração em anéis, mostra que o ensaio brasileiro geralmente produz resultados de tensões mais satisfatórios e próximos do ensaio de tração direta. Normalmente, o ensaio brasileiro ainda é o mais utilizado para determinar a resistência à tração da amostra, uma vez que a preparação do corpo de prova e a realização do ensaio é mais simples do que o ensaio de tração direta.

Os diferentes resultados encontrados nos estudos discutidos acima mostram que não existe um parâmetro uniforme a ser adotado da origem da fissura e de sua propagação.

3

Materiais e métodos

3.1 Materiais

Para a fabricação dos corpos de prova utilizados neste trabalho, fez-se uso de materiais secos para originar uma argamassa cimentícia, tais como Cimento Portland CPV de alta resistência inicial fabricado pela empresa Lafarge Holcim e areia do rio com diâmetro máximo de 1,18mm. A utilização de materiais cimentícios proporciona uma facilidade na moldagem e obtém-se uma homogeneidade nos resultados. A argamassa apresenta grãos menores que o concreto, que por sua vez contém britas cujos grãos são graúdos, gerando imperfeições. A argamassa permite trabalhar com corpos de provas menores para um melhor controle das moldagens.

A areia proveniente do rio foi utilizada como agregado miúdo com granulometria passante na peneira 1,18mm e retida na 0,15mm, a qual apresenta boa compatibilidade com o cimento. As peneiras utilizadas foram com abertura de 1,18mm; 0,60mm; 0,30mm; 0,15mm, postas em ordem decrescente sob um agitador mecânico, da marca Mesh. Foi utilizado o passante da peneira 1,18mm e retida na peneira 0,15mm, sendo descartado o retido na peneira 1,18mm e no fundo.

O traço adotado foi 1:3:0,5 (cimento, areia e água). Os corpos de prova utilizados no presente trabalho foram produzidos através de moldes metálicos cilíndricos com dimensões de 50x100mm. A argamassa foi misturada em argamassadeira planetária com capacidade de 5 litros da seguinte forma, conforme Souza (2008):

- i) A água é adicionada na cuba por 10 segundos
- ii) Adição do cimento por 60 segundos
- iii) Mistura inicial por 30 segundos
- iv) Adição da areia por 180 segundos
- v) Mistura por 180 segundos
- vi) Parada de 60 segundos
- vii) Mistura final de 60 segundos

Logo após o processo de mistura, a argamassa foi posta nos moldes cilíndricos em três camadas. Cada camada foi adensada com o auxílio de um

soquete de ferro, com movimentos circulares. Completados cada molde, vedou-se o topo com papel filme e fita crepe. Ao final do procedimento, os corpos de prova foram curados em temperatura ambiente por 24h, como mostra a Figura 3.1. Após este tempo, os corpos de prova foram desmoldados.



Figura 3.1 - Moldes em repouso de 24hrs.

Conforme a norma ASTM D3967-08 (ASTM, 2008), para a realização do ensaio de tração indireta por compressão diametral, a relação entre espessura e diâmetro em um disco deve estar entre 0,20 e 0,75. Então, as dimensões escolhidas para os discos do presente trabalho são de 25x50mm (espessura e diâmetro respectivamente), que apresenta uma razão de 0,5, respeitando a norma. Os corpos de prova cilíndricos foram cortados em discos em serra diamantada da Arotec, como mostra a Figura 3.2.

Com o auxílio de um paquímetro pôde-se obter uma melhor precisão e controle das medidas do corpo de prova (diâmetro e espessura).



(a)

(b)

Figura 3.2 - Corte do corpo de prova (a) visão geral da máquina AROTEC (b) posicionamento do corpo de prova na máquina AROTEC para ser cortado.

O corpo de prova cilíndrico inteiro apresenta 100mm de comprimento, ou seja, cada cilindro foi cortado na região central em topo, meio e base, com espessura de 25mm. O topo e a base do corpo de prova foram descartados.

Os corpos de prova foram numerados de forma crescente e com indicação de uma seta com o sentido base para topo, tanto para os cilindros quanto para os discos. Nestes últimos foram acrescentadas indicações de base, meio e topo, só para uma possível análise de mudança comportamental do material ao ser ensaiado, conforme mostra a Figura 3.3.

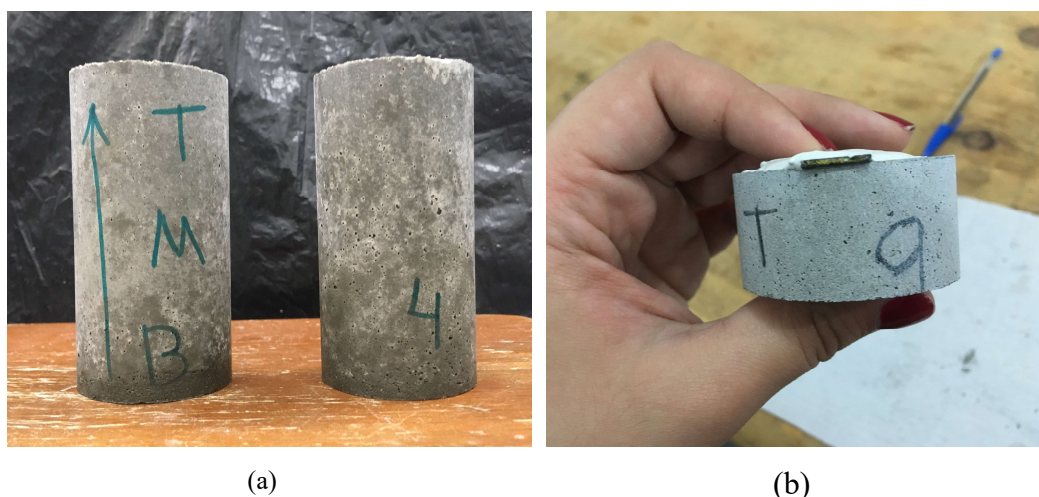


Figura 3.3 - Confeção dos corpos de prova (a) marcação dos cilindros para serem cortados em discos. (b) disco nomeado como CP 9T, disco do topo do corpo de prova 9.

Feita a devida numeração, os corpos de provas são nomeados conforme sua respectiva marcação, por exemplo, CP 5T (corpo de prova do quinto cilindro referente ao disco do topo).

3.2 Métodos

O cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI) apresenta a característica de atingir altas resistências já nos primeiros dias de aplicação; no presente trabalho, os ensaios foram realizados com 48h de idade.

3.2.1 Ensaio Brasileiro

Para a realização do ensaio brasileiro, fez-se uso da máquina de teste MTS 810/500kN situada no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio. O *setup* utilizado está demonstrado na Figura 3.4 (a) e o *clip gage* preso ao corpo de prova está representado na Figura 3.4 (b). Os ensaios foram controlados pela abertura do *clip gage*, a uma taxa de 0,01mm/min.

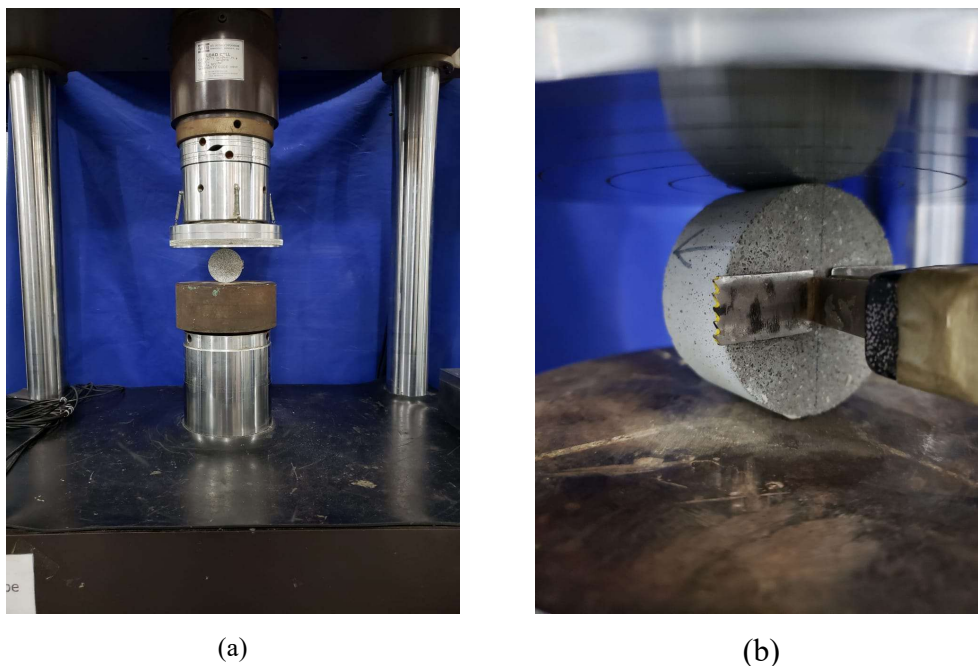


Figura 3.4 - *Setup* do ensaio brasileiro (a) visão geral do ensaio (b) *clip gage* preso ao corpo de prova.

O *clip gage* é um equipamento que mede os deslocamentos entre as placas metálicas onde ele está fixado. Para fixá-lo nos corpos de prova, colaram-se placas metálicas afiadas em seu centro geométrico, diametralmente opostas, com espaçamento de 4,76mm com cola do tipo *Super Bonder*. Depois de colar em todos os discos, passou-se por cima das placas uma massa adesiva do tipo *Plastique*, a fim de se obter uma maior aderência das placas no corpo de prova, conforme a Figura 3.5.

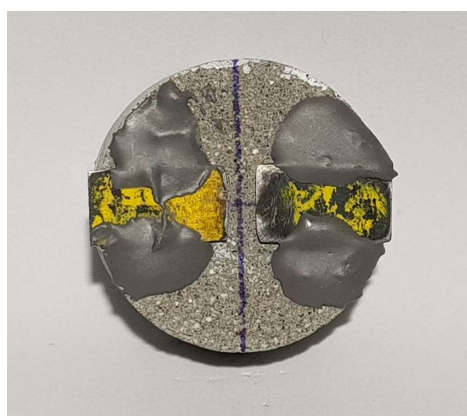


Figura 3.5 - Disco com as placas metálicas coladas, sendo em cinza o *Plastique*.

Após a colagem das placas, os corpos de provas curaram por 15h para poder dar início aos ensaios, como mostra a Figura 3.6. Durante os ensaios, foi necessário fazer uma nova colagem das placas metálicas em corpos de provas reservas. Colou-se com somente *Super Bonder* e esperou-se secar por alguns minutos. Percebeu-se que assim os ensaios falharam. Então colou-se novamente as placas metálicas ao

corpo de prova com a cola do tipo *Super Bonder* e curou por 2h (enquanto os outros ensaios aconteciam). Dessa maneira os resultados não foram afetados.



Figura 3.6 - Corpos de prova após a colagem das placas metálicas para o *clig gage*, curando por 15h.

Foi feita uma análise experimental do ensaio por meio de correlação digital de imagem (DIC) que foi desenvolvida por Sutton et al. (1983). Este tipo de estudo ainda é pouco difundido pelo Brasil, por ser uma visão diferente e inovadora a respeito da obtenção de campos de deformação e/ou deslocamentos por meio de fotos sequenciais. É uma técnica que também permite uma análise dos mecanismos de fissuração do corpo de prova e do seu desenvolvimento ao longo do ensaio.

Para dar início à análise, é preciso determinar a região do corpo de prova em que se quer aplicar essa técnica. A região é dividida em *grids* espaçados igualmente, onde os deslocamentos serão registrados. Feito isso, definem-se os chamados *subsets*, que são subconjuntos de pixels, e os *steps*, que por sua vez é a distância em pixel entre os *subsets*. A análise é feita pela correlação do ponto central do *subset* de uma foto de referência da região delimitada previamente antes da deformação com as fotos já deformadas, conforme a Figura 3.7.

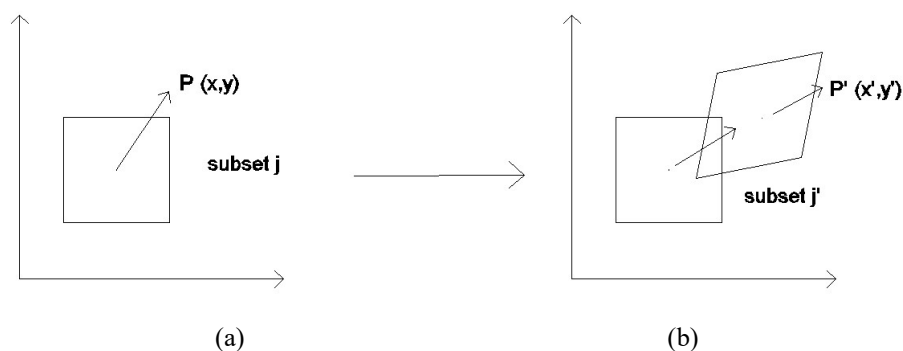


Figura 3.7 - Esquema de correlação de imagens utilizado no programa GOM Correlate (a) Pixel não deformado. (b) Pixel deformado, com coordenadas atualizadas após deformação.

Por meio da ferramenta GOM pôde-se estudar o campo de deformação e/ou deslocamento em x e/ou y baseado em uma sequência de fotos tiradas durante o

ensaio. Para realizar a correspondência entre todos os pontos discretizados dos *subsets*, utilizou-se um algoritmo de correlação de imagens.

Para obter uma homogeneidade dos resultados é necessário que a superfície do corpo de prova apresente um padrão aleatório de alto contraste. Os discos após serem cortados foram pintados com tinta spray branca fosca em uma de suas faces e pigmentada com tinta spray preta fosca, com o intuito de obter um padrão de pigmentação negra que foi analisada no programa GOM, conforme a Figura 3.8 (a).

O *setup* utilizado para realização do ensaio com a técnica DIC apresenta uma câmera digital do modelo Nikon D90 com resolução de 4288 x 2848 pixels, posicionada alinhadamente com o corpo de prova e luzes focais com alta intensidade para gerar um grande contraste com o corpo de prova, como mostra a Figura 3.8 (b). Para a captura das fotos, utilizou-se um computador conectado à câmera com o programa DigiCam Control. Nesse programa pôde-se ajustar a captura automática das fotos de 2 em 2 s.



Figura 3.8 - Técnica da correlação digital de imagem (a) disco após as pinturas com as tintas spray. (b) *Setup* do ensaio brasileiro para captação das imagens para o DIC.

Após a pintura dos discos, realizou-se uma checagem do padrão de pigmentação obtido antes de realizar o ensaio, a fim de precaver possíveis erros durante o ensaio e refazer a pintura caso fosse necessário. Para tal, tirou-se uma foto do disco e analisou-se no programa GOM. A Figura 3.9(a) mostra um padrão aceito e a Figura 3.9(b) mostra um padrão não aceitável. O programa, ao aceitar o padrão, considera o disco apto a ser ensaiado.

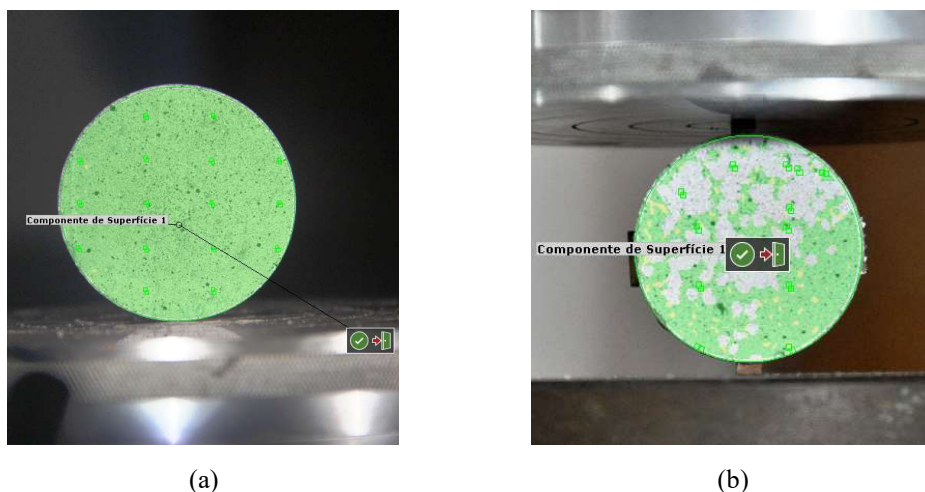
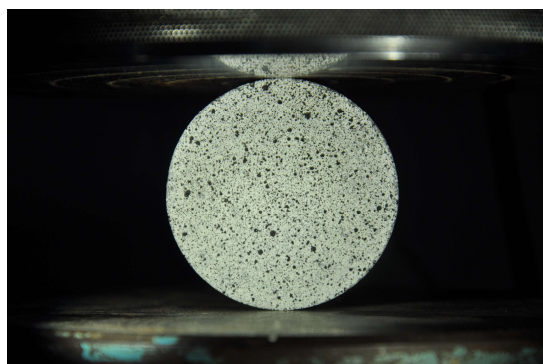


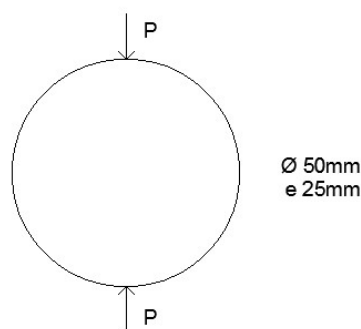
Figura 3.9 - Imagens do corpo de prova analisadas no programa GOM Correlate (a) padrão aceito pelo programa (b) padrão não aceito pelo programa.

3.2.1.1 Aplicação direta de carga

Essa condição de contorno é a mais simples de ser realizada. Consiste na aplicação direta de carga no corpo de prova, como está evidenciado na Figura 3.10. Não apresentou nenhuma dificuldade na sua confecção e nem na realização dos ensaios.



(a)



(b)

Figura 3.10 - Corpo de prova com aplicação direta de carga (a) disco pronto para ser ensaiado (b) representação esquemática.

3.2.1.2 Aplicação de carga por meio de ripas de madeira

Para os ensaios realizados com aplicação de carga por meio de ripas de madeira, os corpos de provas tiveram duas ripas de madeiras coladas com a cola do tipo *Super Bonder* na linha geométrica central do disco. Elas apresentam 5x25x3mm de dimensões (largura, comprimento e altura, respectivamente). Conforme a D3967-08 (ASTM, 2008), a altura necessária da ripa de madeira deve ser de até 6,4mm.

A Figura 3.11 mostra o ensaio sendo realizado com a aplicação de carga por meio de ripas de madeira e sua representação esquemática, respectivamente.

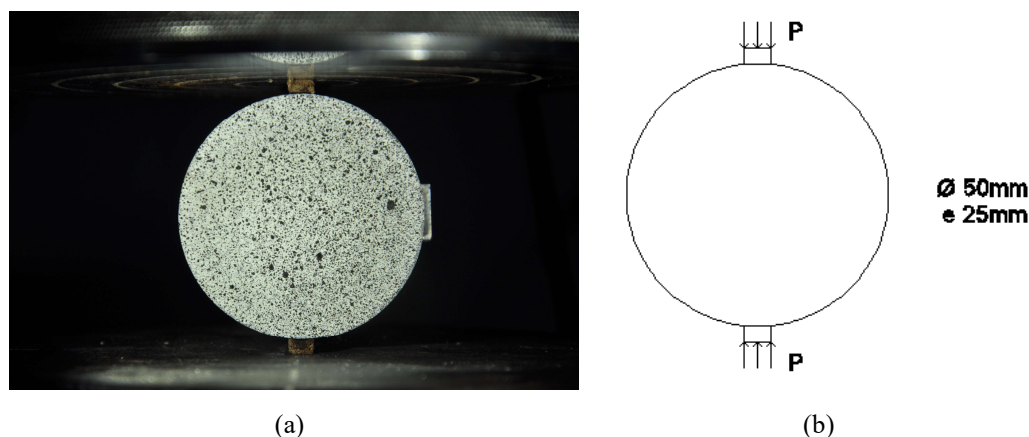


Figura 3.11 - Corpo de prova com aplicação de carga por meio de ripas de madeira (a) disco pronto para ser ensaiado (b) representação esquemática.

3.2.1.3 Aplicação de carga por meio de tiras de papelão

Para os ensaios realizados com aplicação de carga por meio de tiras de papelão, os corpos de provas tiveram duas tiras de papelão coladas com a cola do tipo *Super Bonder* na linha geométrica central do disco. Para a realização do ensaio, faz-se necessário um tempo de secagem da cola de 5min. As tiras apresentam dimensões de 5x25x0,5mm (largura, comprimento e altura, respectivamente).

Segundo a D3967-08 (ASTM, 2008), a altura da tira de papelão deve ser igual a $0,01D$, ou seja, $0,01 \times 50\text{mm} = 0,5\text{mm}$. A Figura 3.12 mostra o ensaio sendo realizado e uma representação esquemática, respectivamente.

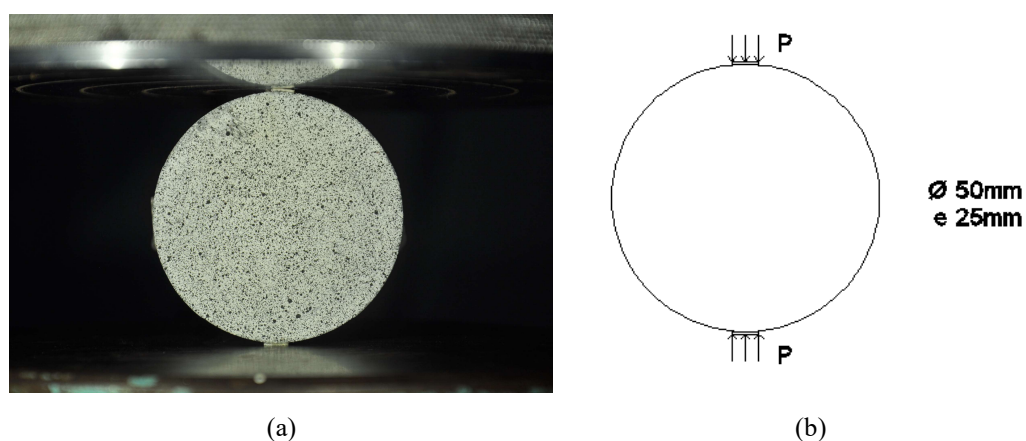


Figura 3.12 - Corpo de prova com aplicação de carga por meio de tiras de papelão (a) disco pronto para ser ensaiado (b) representação esquemática.

3.2.1.4 Aplicação de carga por meio de mordentes de aço

Para os ensaios realizados com aplicação de carga por meio de mordentes de aço, utilizaram-se duas peças curvas de aço envolvendo o disco. Elas foram

posicionadas no centro das placas da máquina MTS e os discos por sua vez foram posicionados no centro dos mordentes.

Segundo a D3967 (ASTM, 2008) o ângulo de contato entre a amostra e os mordentes devem ser de no máximo 15°. No referido trabalho, o ângulo utilizado foi de 13°. A Figura 3.13 mostra o ensaio sendo realizado e uma representação esquemática, respectivamente.

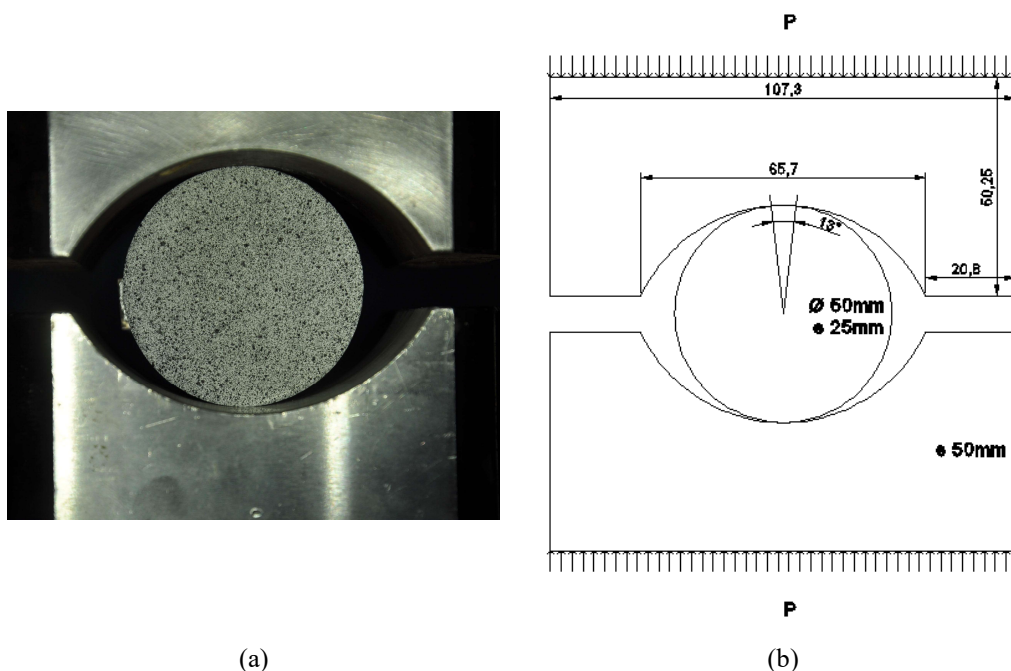


Figura 3.13 - Corpo de prova com aplicação de carga por meio mordentes de aço (a) disco pronto para ser ensaiado (b) representação esquemática.

Para a obtenção da resistência à tração do corpo de prova com aplicação de carga por meio de mordentes de aço é utilizada a equação (3.1) (2.1), conforme a norma D3967-08 (ASTM, 2008):

$$\sigma = \frac{1,272P}{\pi t D} \quad (3.1)$$

Onde P é a máxima carga aplicada pela máquina, em N, t é a espessura do disco e D é diâmetro do disco, ambas em mm.

3.2.1.5 Aplicação de carga por meio de barras de aço

Esta condição de contorno consiste em posicionar as barras de aço alinhadamente entre o eixo da máquina MTS e a linha geométrica central do disco. As barras apresentam diâmetro de 10mm e comprimento de 50mm. Elas foram soldadas em pequenas chapas metálicas a fim de dar uma melhor estabilidade para o sistema. Utilizou-se uma mira a laser para averiguar se o sistema estava alinhado.

A Figura 3.14 mostra o ensaio sendo realizado e uma representação esquemática, respectivamente.

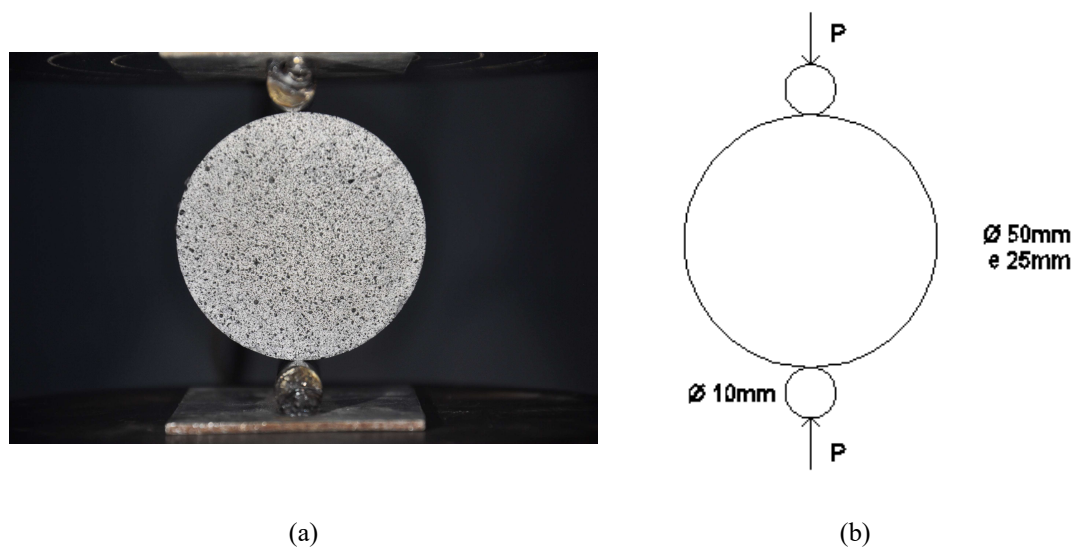


Figura 3.14 - Corpo de prova com aplicação de carga por meio de barras de aço (a) disco pronto para ser ensaiado (b) representação esquemática.

3.2.1.6 Aplicação e carga sobre chanfros

A aplicação de carga sobre os chanfros tem por função gerar uma maior distribuição da carga aplicada uma vez que tem a maior superfície de contato com a máquina. Tem como objetivo também aliviar as tensões nas regiões próximas à zona de aplicação de carga. Para a realização de alguns ensaios com o chanfro, precisou-se do uso da rótula entre o disco e a máquina, para nivelar o contato das pontas do chanfro com a rótula.

Os chanfros realizados nos discos são uma mudança em sua geometria, que consiste em “cortes” em suas extremidades. Conforme Wang et al. (2004) o chanfro pode apresentar $2\alpha = 20^\circ$ ou $2\alpha = 30^\circ$, como mostra a Figura 3.16 (b).

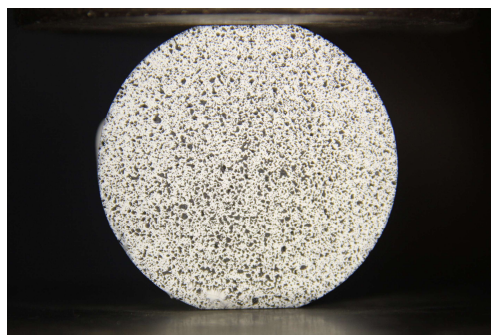
Para conseguir um chanfro com ângulo de 30° , foram feitas 3 tentativas. A primeira consistiu em moldar corpos de provas havendo posicionadas na linha geométrica central do molde duas serras metálicas com as dimensões corretas, como mostra a Figura 3.15. Porém, ao desmoldar, o corte não apareceu como foi o esperado, apresentavam pequenos ressaltos formados devido às laterais das serras.



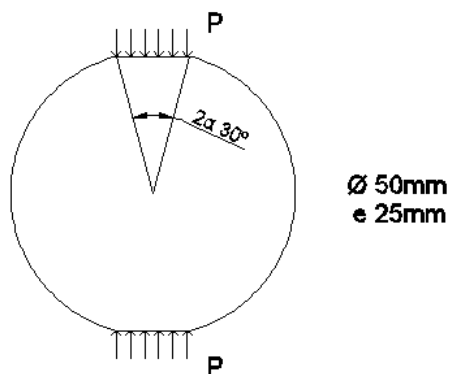
Figura 3.15 - Tentativa de moldar o chanfro com serras metálicas.

A segunda tentativa consistiu em fazer marcações no disco com a indicação do ângulo de 30° e lixar até atingir a marcação do chanfro. Porém, como o processo é muito manual e qualquer deslize já altera o resultado, os chanfros por meio desse método não ficaram como desejado.

Por fim, optou-se em fazer as mesmas marcações igual na segunda tentativa, porém cortando na serra adiamantada da Arotec. A Figura 3.16 mostra o ensaio sendo realizado.



(a)



(b)

Figura 3.16 - Corpo de prova com aplicação de carga sobre os chanfros (a) disco pronto para ser ensaiado (b) representação esquemática.

Para a obtenção da resistência à tração do corpo de prova com a condição de aplicação de carga sobre os chanfro, é utilizada a equação (3.2), conforme Wang et al. (2004) para um ângulo de corte igual a $2\alpha = 30^\circ$:

$$\sigma = 0,92 \frac{2P}{\pi t D} \quad (3.2)$$

Onde P é a máxima carga aplicada pela máquina, em N, t é a espessura do disco e D é o diâmetro do disco, ambos em mm.

3.2.2 Ensaio de compressão uniaxial

Após a desmoldagem dos corpos de prova, eles foram faceados na serra diamantada da Arotec, a fim de se obter uma superfície plana.

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados na máquina de testes da MTS modelo 810/500 kN com controle de deformação circunferencial por meio de um LVDT (transformador diferencial variável linear) posicionado na horizontal, a uma taxa de 0,08mm/min, como mostra a Figura 3.18 (a). No sistema foram posicionados dois LVDTs no eixo vertical paralelos à altura do corpo de prova, e um LVDT na região radial, no centro do disco. Todos os LVDTs apresentam tamanho de 5mm. A finalidade do ensaio por controle radial é obter o comportamento pós pico da curva do material. Com a aquisição das medidas de deformação axial e radial provenientes dos LVDTs, é possível calcular o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson da argamassa cimentícia. Conforme a C469-02 (ASTM, 2010) o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson podem ser calculados por meio das equações (3.3) e (3.4), respectivamente.

$$E = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{(\varepsilon_2 - 0,000050)} \quad (3.3)$$

$$\nu = \frac{(\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1})}{(\varepsilon_2 - 0,000050)} \quad (3.4)$$

Onde σ_2 é a tensão correspondente a 40% da carga última, σ_1 é a tensão correspondente a deformação longitudinal ε_1 de 50×10^{-6} , ε_2 é a deformação longitudinal produzida pela tensão σ_2 , ε_{t2} é a deformação transversal da metade da altura do corpo de prova produzida pela σ_2 e ε_{t1} é a deformação transversal na metade da altura do corpo de prova produzida pela σ_1 .

O ensaio de compressão uniaxial por controle radial teve como objetivo caracterizar o material, obtendo suas propriedades mecânicas de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. A Figura 3.17 mostra uma curva característica dos ensaios de compressão uniaxial realizados. Os corpos de prova apresentaram resistência à compressão uniaxial de $29,1 \pm 1,1$ MPa, módulo de elasticidade de $25,0 \pm 0,8$ GPa e coeficiente de Poisson de $0,21 \pm 0,01$.

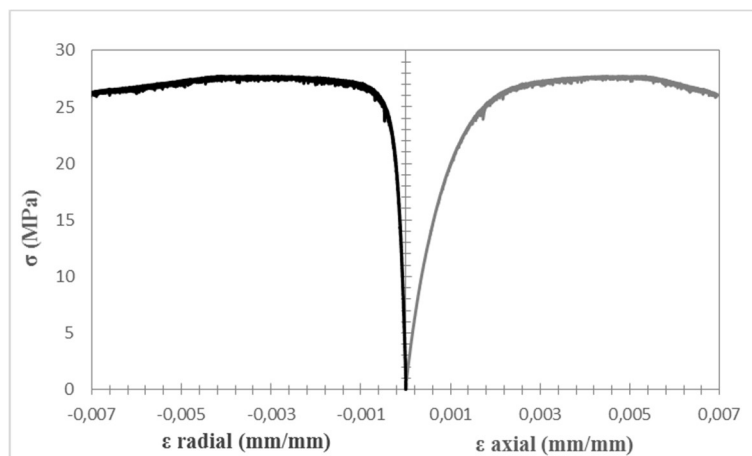


Figura 3.17 - Gráfico de uma curva característica de tensão versus deformação radial/horizontal dos ensaios de compressão uniaxial.

Foram realizados ensaios de compressão uniaxial na máquina Controls, a fim de se realizar dois tipos de controle. A Figura 3.18 (b) mostra o *setup* realizado para esse ensaio. O primeiro que consistiu no teste de compressão de corpos de prova cilíndricos para cada dia de moldagem, a fim de verificar a homogeneidade dos resultados obtidos, pois desta maneira verifica-se a consistência da moldagem. O segundo foi realizado ao longo do terceiro dia de cura da argamassa, a fim de verificar se haveria evolução significativa da resistência à compressão (e, portanto, da hidratação do cimento) durante ao longo dos dias de ensaio. Para esta série, foram moldados nove corpos de prova cilíndricos, que foram ensaiados da seguinte forma: foram ensaiados três corpos de prova às 8h, três às 12h e três às 18h. Os resultados obtidos nos dois ensaios da máquina Controls estão no anexo A. Eles mostram que não houve variação significativa entre moldagens realizadas em dias diferentes. Além disso, indicam que os corpos de prova ensaiados em horários diferentes do terceiro dia após a moldagem tinham resistências à compressão similares e, portanto, graus de hidratação parecidos. Portanto, ensaios brasileiros realizados em diferentes momentos do terceiro dia de cura não devem apresentar variações de resultados devido à idade da argamassa.



(a)



(b)

Figura 3.18 – *Setup* dos ensaios complementares realizados (a) ensaio de compressão uniaxial por controle radial. (b) ensaio na máquina controls.

4 Ensaio experimentais e resultados

Devido a problemas experimentais, tais como falta de alinhamento, acúmulo de carga, entre outros, nem todos os corpos de prova ensaiados foram considerados nas análises dos resultados experimentais. Foram ensaiados seis corpos de prova sob aplicação direta de carga, porém um ensaio foi descartado da análise. Já com a aplicação de carga por meio de ripas de madeira, foram realizados cinco ensaios e um não foi considerado. Dos oito ensaios realizados com a aplicação de carga por meio de tiras de papelão, apenas quatro foram analisados. Após o ensaio, foi observado que algumas tiras estavam mal coladas e não estavam alinhadas.

Foram realizados dez ensaios brasileiros com os mordentes de aço e quatro não foram considerados. A Figura 4.1 mostra os ensaios válidos com o uso dos mordentes.

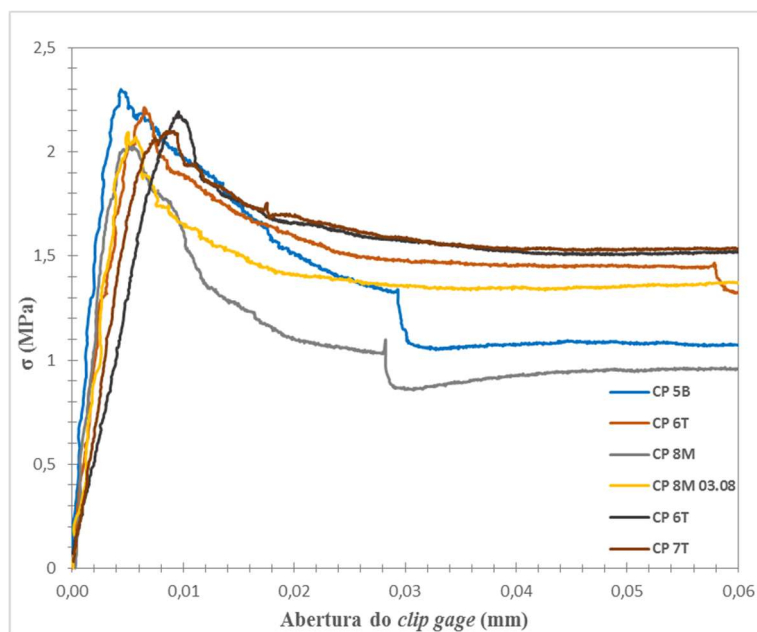


Figura 4.1 - Gráfico tensão *versus* abertura do clip gage com aplicação de carga por meio de mordentes de aço.

Nota-se que as inclinações das porções lineares com os mordentes de aço variaram muito, apesar de terem praticamente a mesma carga de pico e a mesma resistência à tração. Tal diferença pode ter sido gerada a partir do procedimento de ensaio, como diferentes posicionamentos do disco para a acomodação da superfície

com os mordentes, e por isso o deslocamento inicial adquirido talvez não tenha sido ainda o com os mordentes adaptados ao corpo de prova.

Com a aplicação de carga por meio de barras de aço foram ensaiados cinco corpos de prova, porém um ensaio foi excluído da análise. Foram ensaiados sete corpos de prova com aplicação de carga sobre os chanfros e três deles foram descartados.

A Figura 4.2 mostra a comparação das curvas características tensão *versus* abertura do *clip gage* obtidas durante os ensaios com as seis diferentes configurações de aplicação de carga. As curvas referentes a todos os ensaios considerados válidos estão no anexo B.

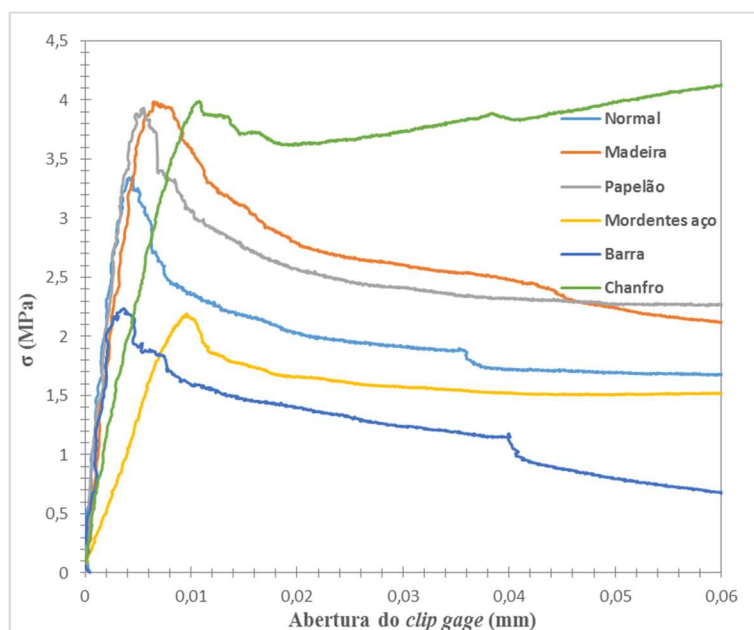


Figura 4.2 - Gráfico tensão versus abertura do *clip gage* dos ensaios representativos de cada condição de aplicação de carga.

A Tabela 4.1 mostra as médias das resistências à tração obtida por meio das equações (2.15) para aplicação direta de carga, com ripas de madeira, com tiras de papelão e com o uso de barras de aço, (3.1) com o uso de mordentes de aço e (3.2) para os chanfros e a

Tabela 4.2 mostra as cargas de pico obtidas.

Tabela 4.1 - Resultados de resistência à tração de todas as condições de aplicação de carga.

Resistência à Tração (MPa)						
	Direta	Madeira	Papelão	Mordentes de aço	Barra	Chanfro
Média	3,46	4,12	3,64	2,15	2,26	4,03
DP	0,20	0,23	0,18	0,09	0,15	0,24
Coef. Var.	5,66	5,56	5,01	4,27	6,48	5,84

Tabela 4.2 - Valores de carga de pico de todas as condições de aplicação de carga.

	Carga de Pico (N)					
	Direta	Madeira	Papelão	Mordentes de aço	Barra	Chanfro
Média	6795,60	8095,00	7690,75	6654,50	4433,50	8622,97
DP	382,22	451,35	356,07	278,58	292,58	504,14
Coef. Var.	5,62	5,57	4,62	4,18	6,59	5,84

Os corpos de prova submetidos à aplicação de carga por meio de barras de aço apresentaram os menores valores de resistência à tração. Há concentrações de tensões nas zonas de aplicação de carga. Os corpos de prova ensaiados com mordentes de aço tiveram resultados próximos aos da barra de aço, devido ao ensaio não se comportar como o esperado, que era de distribuir a carga e aliviar as tensões sob um arco de 13 graus. Os resultados com aplicação de carga por meio de ripas de madeira, tiras de papelão e sobre chanfros tiveram valores de média bem próximos e conseguiram distribuir a carga aplicada. Os resultados dos corpos de prova com aplicação direta de carga ficaram entre os valores da dupla de barra de aço e mordente de aço e do trio com o uso de ripas de madeira, tiras de papelão e chanfros. Os resultados são esperados, pois a aplicação direta de carga está entre a forma de aplicação de carga da barra de aço, que é uma situação mais extrema de concentração de carga, e a aplicação de carga por meio de madeira, papelão e chanfros, que são maneiras de distribuir as tensões.

4.1 Digital image correlation (DIC)

Com o uso do programa GOM Correlate por meio de correlação digital de imagens (DIC) foi possível visualizar as fissuras das amostras ensaiadas e as suas propagações, assim como o campo de deformação nas faces pigmentadas. Para realizar a análise do DIC escolheu-se um corpo de prova característico de cada uma das seis condições de aplicação de carga que mais se aproximou dos valores médios obtidos experimentalmente.

Para cada análise foram construídos gráficos de tensão *versus* tempo, onde este representa o tempo total do ensaio. No gráfico de tensão *versus* tempo é possível estimar o momento do ensaio em que as fissuras se propagam. Também foram construídos gráficos de tensão *versus* deformação horizontal.

O gráfico da Figura 4.3 (a) mostra tensão *versus* tempo da condição de aplicação direta de carga, e o gráfico da Figura 4.3 (b) mostra tensão *versus* deformação horizontal desse corpo de prova.

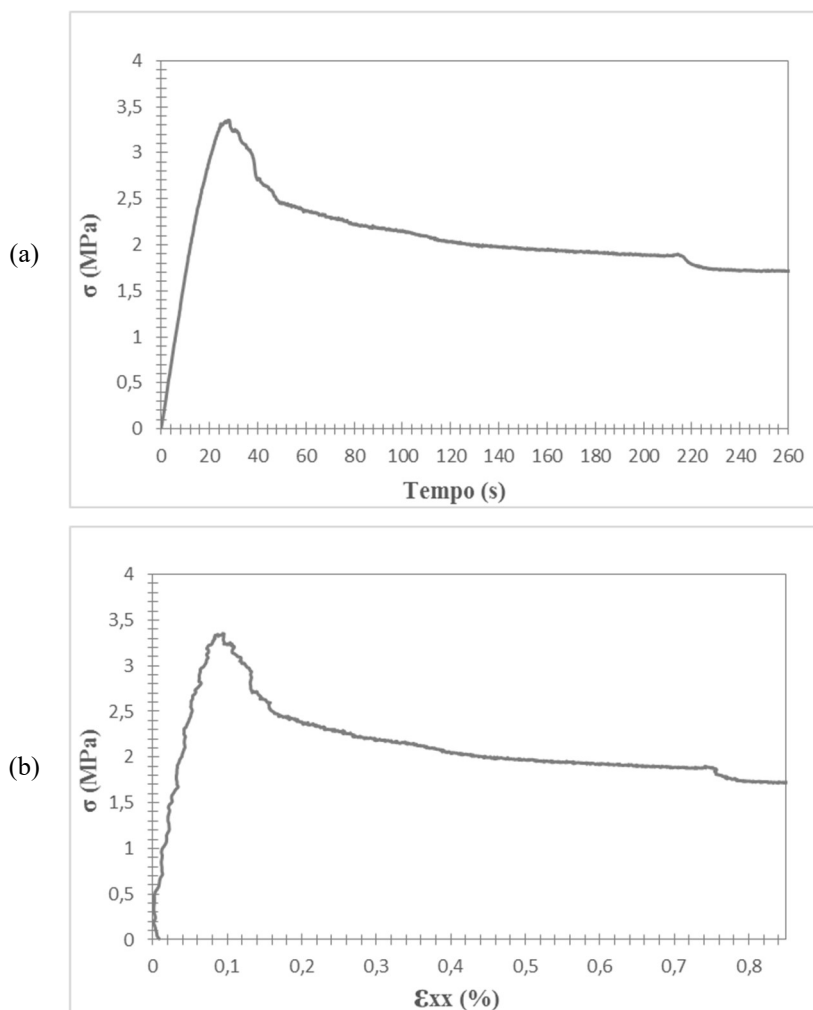


Figura 4.3 - Gráficos do corpo de prova característico com aplicação direta de carga (a) tensão *versus* tempo (b) tensão *versus* deformação horizontal.

Nesse ensaio, foi possível visualizar pelos gráficos que o primeiro pico e o começo da fissura ocorreram em torno de 28s. Então, o primeiro pico ocorre na foto 14. O segundo pico ocorre em 220s, ou seja, na foto 110. No primeiro pico, o corpo de prova começou a romper quando atingiu 0,1% de deformação, e o segundo pico aconteceu com 0,75% de deformação. A Figura 4.4 mostra as fotos 14 e 110, que representam o campo de deformação horizontal calculado pela correlação digital de imagens do primeiro e segundo pico respectivamente, da aplicação direta de carga.

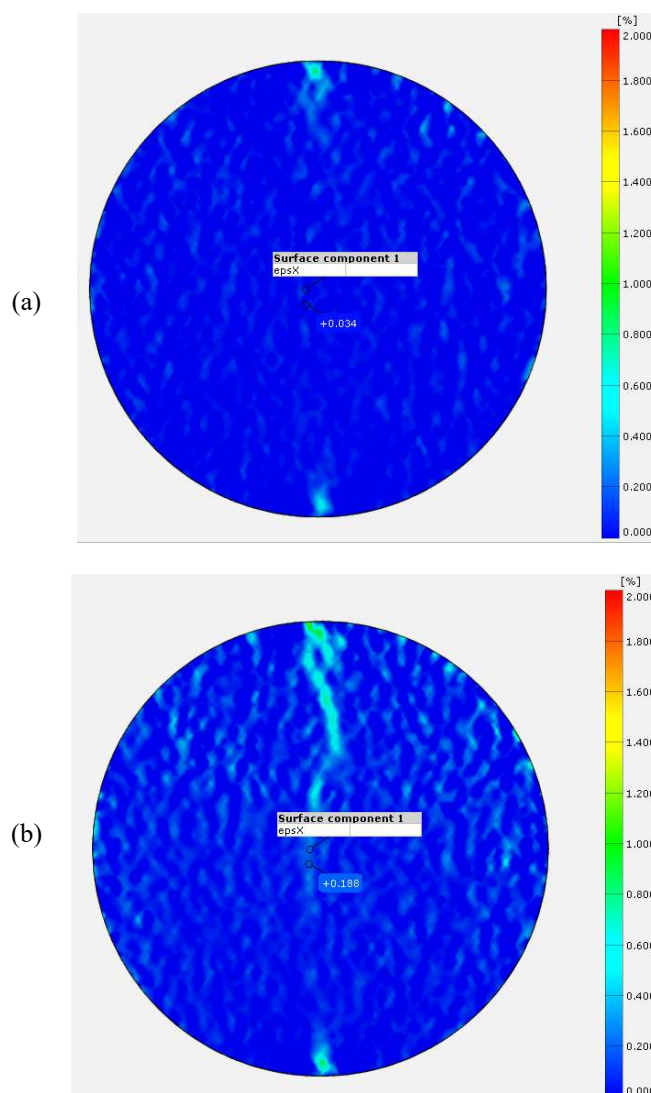


Figura 4.4 - Campo de deformação horizontal obtidos através da análise do DIC da aplicação direta de carga (a) Foto 14, não é possível visualizar o surgimento da fissura. (b) Foto 110, sendo possível visualizar o início da formação da fissura.

Por meio da correlação digital de imagens foi possível visualizar que as fissuras obtidas por meio da aplicação direta de carga se originaram nas extremidades, pois houve uma concentração de tensão nessa região. Ao longo do ensaio a fissura segue para o centro geométrico do disco. Há o surgimento de uma segunda fissura no corpo de prova pois há um esmagamento devido ao rearranjo proveniente após o surgimento da primeira fissura, o qual promove um novo contato do disco com aplicação direta de carga.

A Figura 4.5 mostra os gráficos de tensão *versus* tempo e tensão *versus* deformação horizontal da aplicação de carga por meio de ripas de madeira.

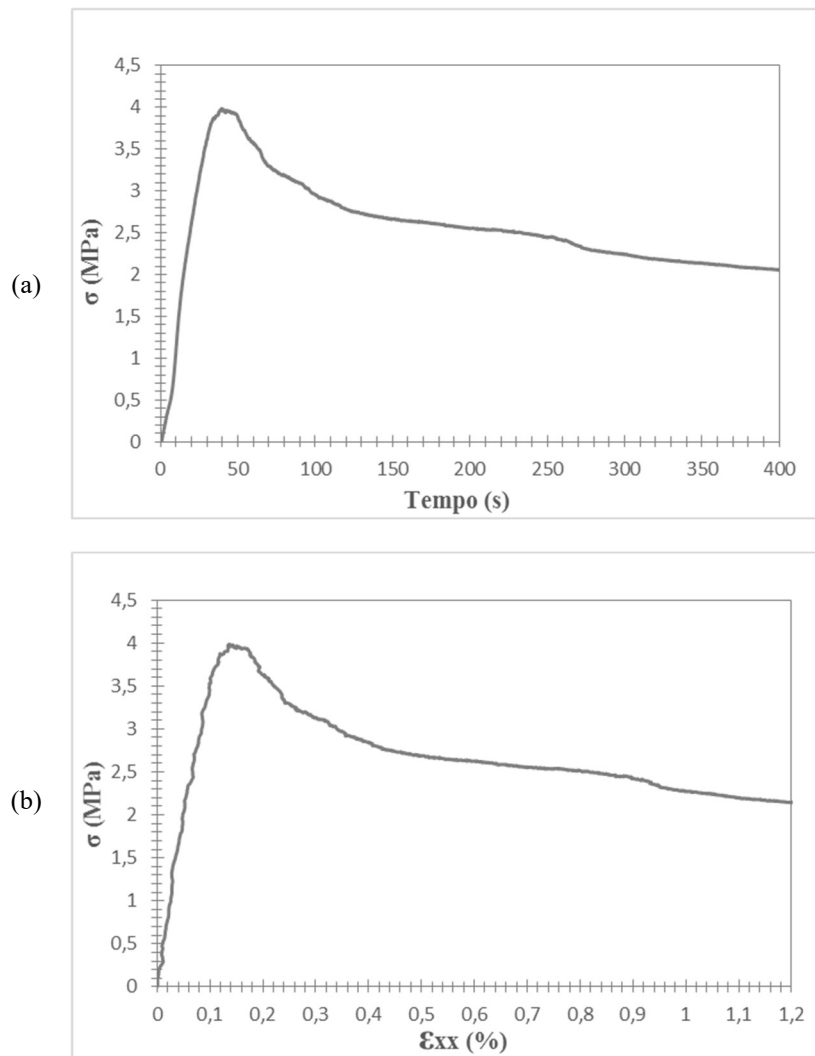


Figura 4.5 - Gráficos do corpo de prova característico com aplicação de carga por meio de ripas de madeira (a) tensão *versus* tempo (b) tensão *versus* deformação horizontal.

Nesse ensaio foi possível visualizar pelo gráfico que o primeiro pico ocorre em 40s, ou seja, na foto 20 obtida durante o ensaio, e o segundo pico ocorre em 264s, que representa a foto 132. Ao atingir o primeiro pico, o corpo de prova começou a romper quando chegou a 0,15% de deformação, e 0,92% no segundo pico. A Figura 4.6 mostra as fotos 20 e 132, que representam o campo de deformação horizontal calculado pela correlação digital de imagens do primeiro e o segundo pico do corpo de prova com ripas de madeira.

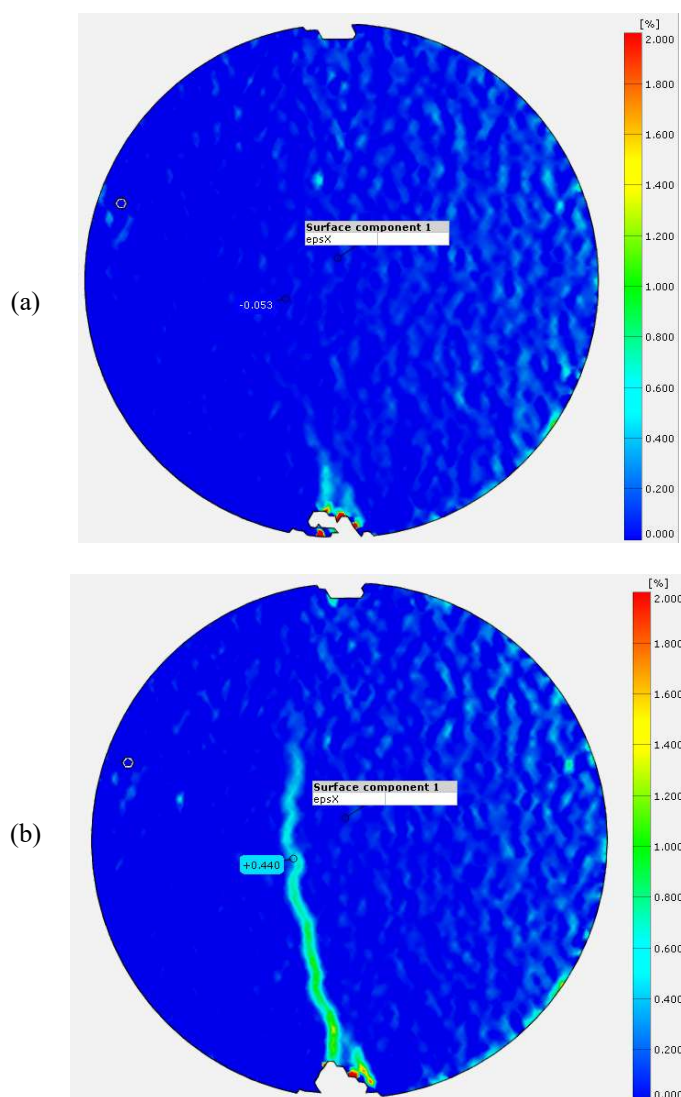


Figura 4.6 - Campo de deformação horizontal obtidos através da análise do DIC da aplicação de carga por meio de ripas de madeira (a) Foto 20, sendo possível visualizar o início da fissura na parte inferior do disco (b) Foto 132, sendo possível visualizar a fissura se propagando.

A correlação digital de imagens percebeu imperfeições no padrão da superfície do disco nas regiões próximas a aplicação de carga pois houve um pouco de escorrimento do *Super Bonder* utilizado para colar as ripas de madeira no disco. Porém, essas falhas na análise das correlações de imagens não afetaram o resultado. Pôde-se notar que nesse ensaio a fissura iniciou próxima a aplicação de carga na parte inferior do disco e depois propagou para o centro geométrico.

A Figura 4.7 mostra os gráficos de tensão *versus* tempo e tensão *versus* deformação horizontal com aplicação de carga por meio de tiras de papelão.

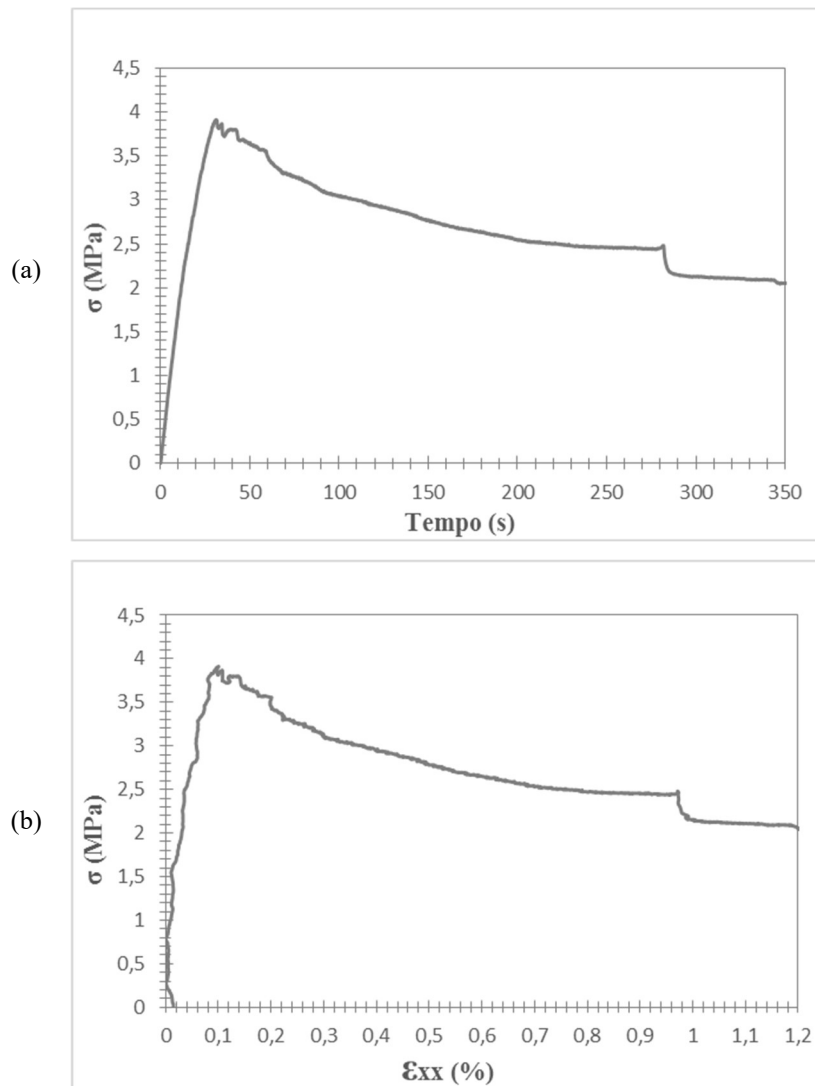


Figura 4.7 - Gráficos do corpo de prova característico com aplicação de carga por meio de tiras de papelão (a) tensão *versus* tempo (b) tensão *versus* deformação horizontal.

A análise dos gráficos mostra que o primeiro pico ocorreu em 32s e o segundo pico ocorreu em 290s, ou seja, na foto 16 e 145, respectivamente. No primeiro pico, o corpo de prova começou a romper quando atingiu 0,1% de deformação, e o segundo pico aconteceu com 0,97% de deformação. A Figura 4.8 mostra as fotos 16 e 145, que representam o campo de deformação horizontal calculado pelo DIC do primeiro e segundo pico respectivamente, da condição de contorno com tiras de papelão.

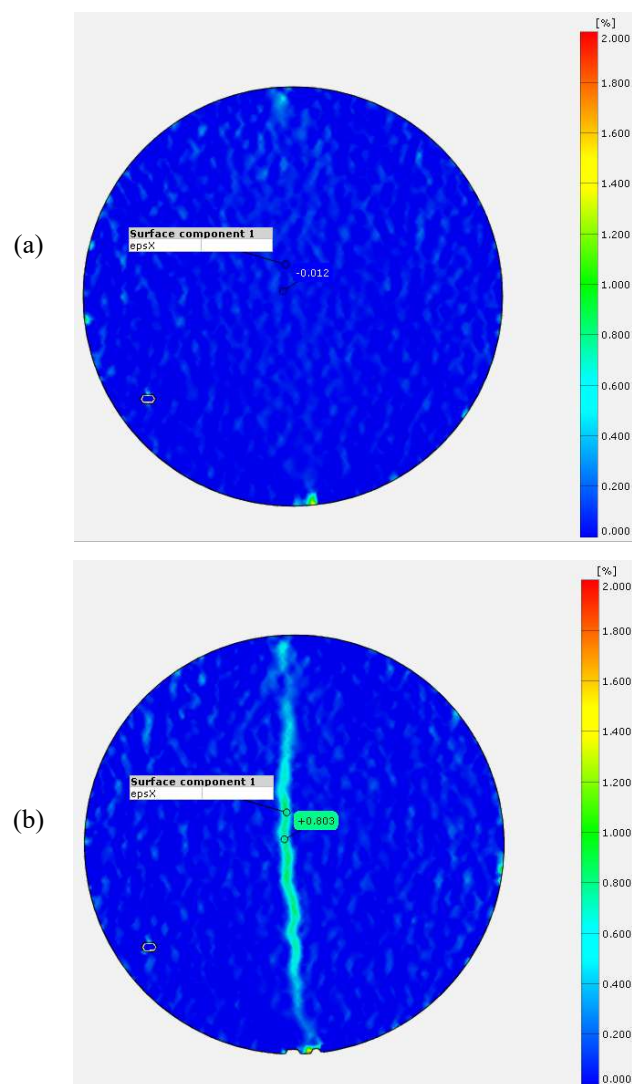


Figura 4.8 - Campo de deformação horizontal obtidos através da análise do DIC da aplicação de carga por meio de tiras de papelão (a) Foto 16, sendo possível visualizar uma leve concentração de carga na parte inferior do disco (b) Foto 145 referente ao segundo pico, sendo possível visualizar a fissura surgindo na região central do disco.

Por meio da análise de correlação digital de imagens as fissuras obtidas com aplicação de carga por meio de tiras de papelão originaram-se no meio do disco.

A Figura 4.9 mostra os gráficos de tensão *versus* tempo e tensão *versus* deformação horizontal com aplicação de carga por meio de mordentes de aço.

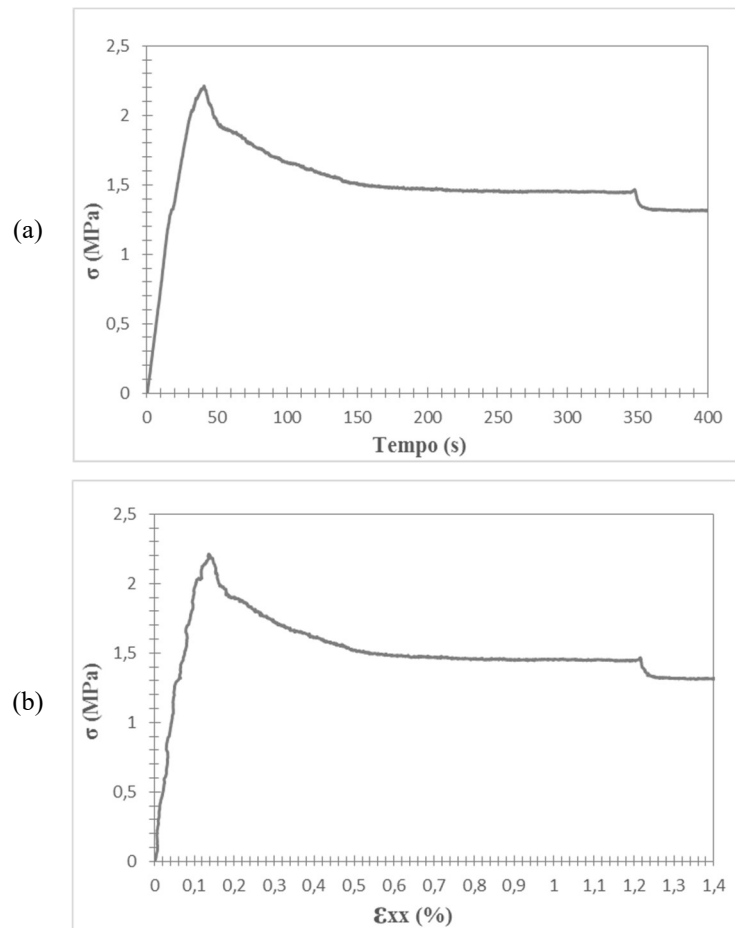


Figura 4.9 - Gráficos do corpo de prova característico com aplicação de carga por meio de mordentes de aço (a) tensão *versus* tempo (b) tensão *versus* deformação horizontal.

Nesse ensaio foi possível visualizar pelo gráfico que o primeiro pico e o segundo pico ocorreram em 40s e 350s, respectivamente. Então, as fotos que representam esses tempos, no programa GOM Correlate, são a 20 e a 175. No primeiro pico, o corpo de prova começou a romper quando atingiu 0,13% de deformação, e o segundo pico aconteceu com 1,21% de deformação. A Figura 4.10 mostra as fotos 20 e 175, que representam o campo de deformação horizontal calculado pelo DIC do primeiro e segundo pico respectivamente, com aplicação de carga por meio de mordentes de aço.

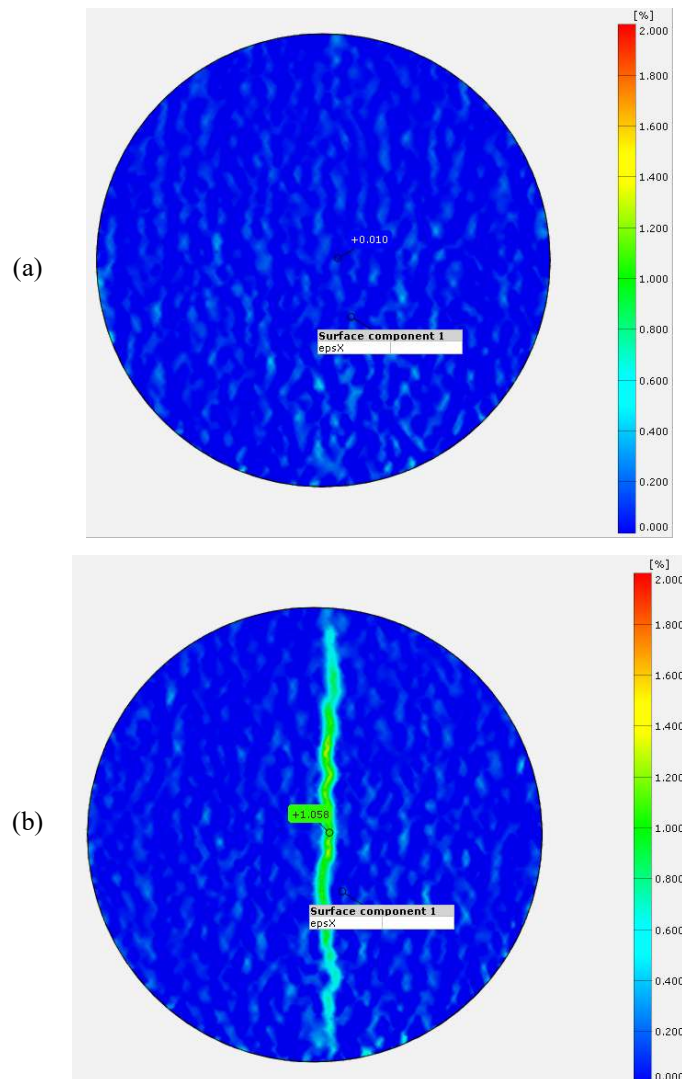


Figura 4.10 - Campo de deformação horizontal obtidos através da análise do DIC da aplicação de carga por meio de mordentes de aço (a) Foto 20, não sendo possível visualizar o surgimento da fissura (b) Foto 175 referente ao segundo pico, sendo possível analisar que a fissura começou a propagação na região próxima a aplicação de carga, porém se propagou a partir do centro do disco de forma homogênea.

O ensaio brasileiro com o uso de mordentes de aço entre o disco e a máquina tem a função de distribuir a carga sob uma curva e fazer com que as fissuras se originem no centro do disco. Notou-se com a correlação digital de imagens que as fissuras se concentraram primeiramente na região próxima a aplicação de carga e posteriormente as fissuras se concentraram no centro geométrico do disco, de maneira homogênea. Há o surgimento de uma fissura secundária, devido o disco ser confinado pelos mordentes ao longo do ensaio, gerando uma acomodação do disco e fazendo com que assim outro ponto seja carregado. A Figura 4.11 mostra as fissuras geradas pela aplicação de carga por meio de mordentes de aço.



(a)

(b)

Figura 4.11 - Fissuras obtidas no ensaio brasileiro com o uso de mordentes de aço (a) Face frontal do corpo de prova. (b) Face lateral do corpo de prova. Nota-se que há um leve esmagamento na zona de aplicação de carga e um surgimento de uma segunda fissura.

A Figura 4.12 mostra os gráficos de tensão *versus* tempo e tensão *versus* deformação horizontal com aplicação de carga por meio de barras de aço.

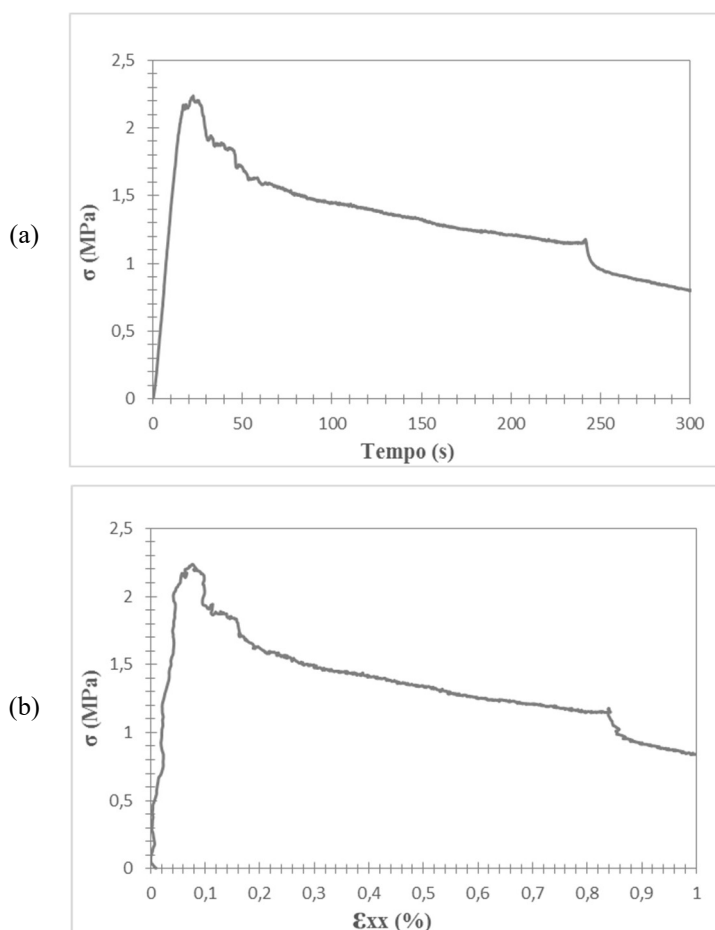


Figura 4.12 - Gráficos do corpo de prova característico com aplicação de carga por meio de barras de aço (a) tensão *versus* tempo (b) tensão *versus* deformação horizontal.

Nesse ensaio foi possível visualizar pelo gráfico que o primeiro pico ocorreu no tempo de 22s e o segundo pico no tempo de 244s. Então, esses tempos são representados pelas fotos 11 e 122 obtidas durante o ensaio e analisadas no

programa GOM Correlate. No primeiro pico o corpo de prova começou a romper quando atingiu 0,08% de deformação, e o segundo ficou quando atingiu 0,84% de deformação. A Figura 4.13 mostra as fotos 11 e 122, que representam o campo de deformação horizontal calculado pelo DIC do primeiro e segundo pico respectivamente, com aplicação de carga por meio de barras de aço.

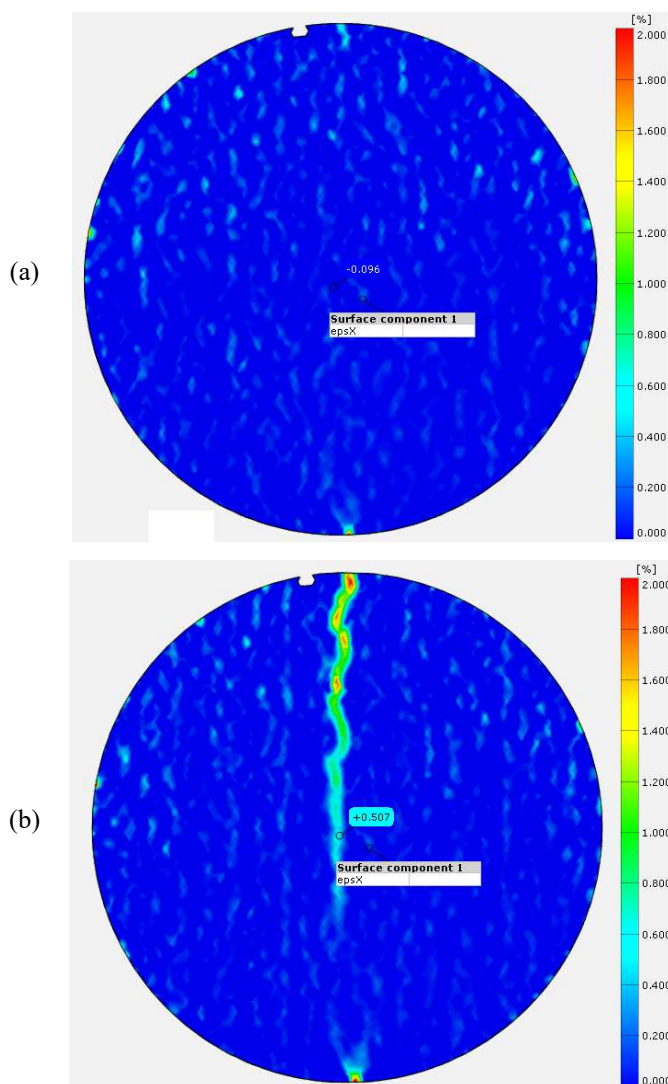


Figura 4.13 - Campo de deformação horizontal obtidos através da análise do DIC da aplicação de carga por meio de barras de aço (a) Foto 11, não sendo possível visualizar o surgimento da fissura (b) Foto 122, sendo possível visualizar a propagação da fissura partindo da zona superior do disco.

Com as imagens feitas pelo GOM Correlate, percebeu-se que no corpo de prova com barras de aço a fissura inicia na zona de aplicação de carga da parte superior e posteriormente propaga para o centro do disco. Essa condição de aplicação de carga apresenta uma fissura única que aconteceu de forma abrupta devido à alta concentração de tensões no ponto de aplicação de carga, o que gerou um esmagamento no contato da barra de aço com o disco. A Figura 4.14 mostra a fissura gerada por esse ensaio.

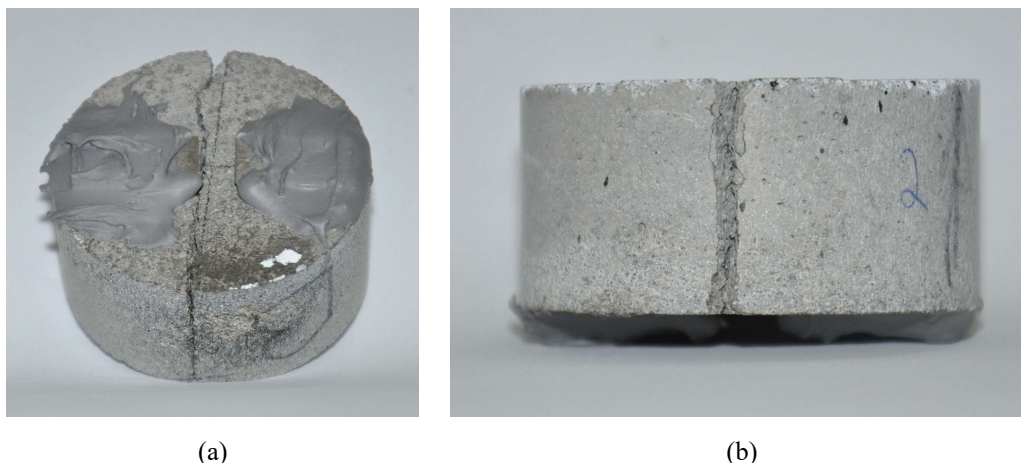


Figura 4.14 - Fissuras do ensaio brasileiro com aplicação de carga por meio de barras de aço (a) Face frontal do corpo de prova. (b) Face lateral do corpo de prova. Nota-se que há um esmagamento na amostra onde estava apoiada à barra de aço.

A Figura 4.15 mostra os gráficos de tensão *versus* tempo e tensão *versus* deformação horizontal com aplicação de carga sobre os chanfros.

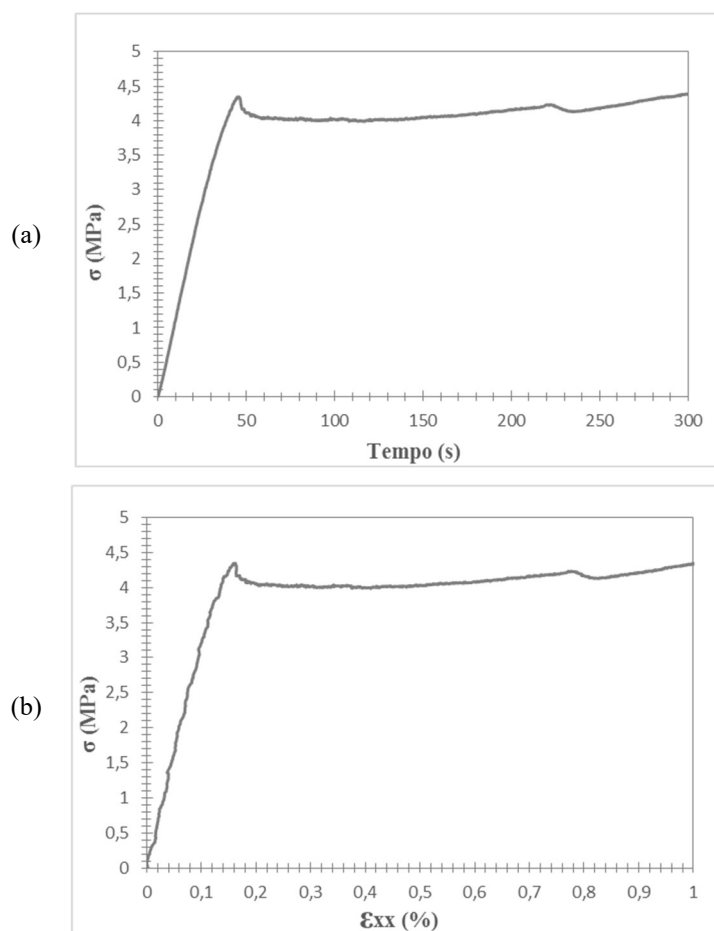


Figura 4.15 - Gráficos do corpo de prova característico com aplicação de carga sobre chanfros (a) tensão *versus* tempo (b) tensão *versus* deformação horizontal.

Nesse ensaio foi possível visualizar pelo gráfico que o primeiro e segundo pico ocorreram no tempo de 46s e 230s, ou seja na foto 23 e na foto 115,

respectivamente. No primeiro pico o corpo de prova começou a romper quando atingiu 0,17% de deformação, e no segundo pico quando atingiu 0,8% de deformação. Com o uso dos chanfros, depois que o corpo de prova rompe, o disco começou a ser ensaiado sob compressão nas suas duas metades, por isso há um ganho na resistência à tração mesmo depois de ter rompido.

A Figura 4.16 mostra a foto 23 e 115, que representam o campo de deformação horizontal calculado pela correlação digital de imagens do primeiro e segundo pico com aplicação de carga sobre os chanfros.

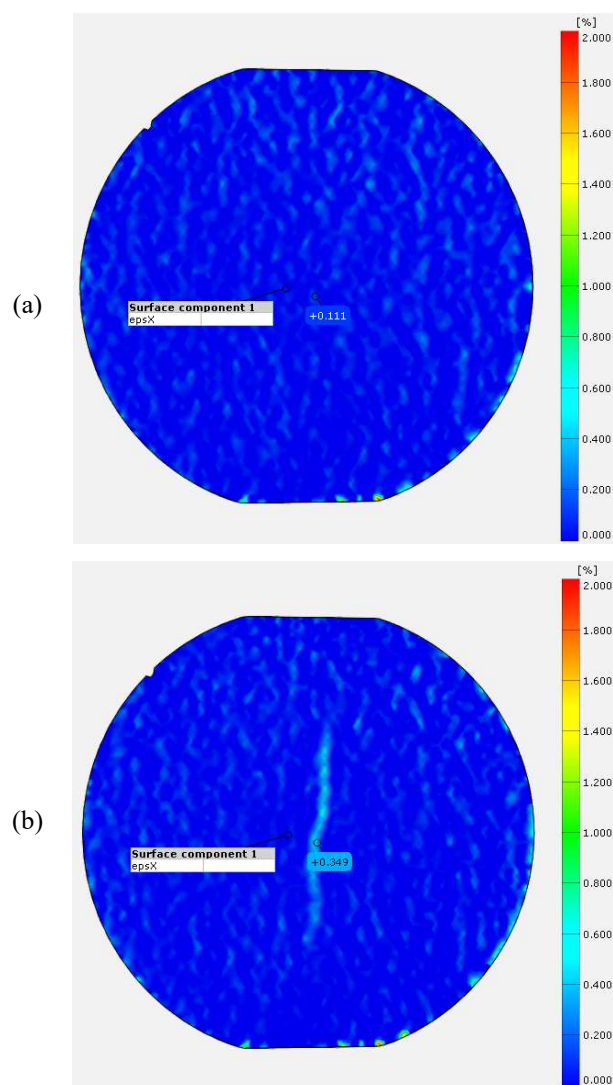


Figura 4.16 - Campo de deformação horizontal obtidos através da análise do DIC da aplicação de carga sobre chanfros (a) Foto 23, não sendo possível visualizar o surgimento da fissura (b) Foto 115, sendo possível visualizar o surgimento da fissura na região central do disco.

Com a análise do DIC, percebeu-se que no corpo de prova representativo com aplicação de carga sobre os chanfros a fissura iniciou no meio do disco.

Entretanto, devido a imperfeições na hora da confecção do corpo de prova, alguns discos apresentaram uma concentração de tensão em uma das pontas do

chanfro. Foi possível visualizar após o término dos ensaios que em alguns corpos de prova as fissuras originaram na região que continha imperfeições no corte, e não no eixo central, conforme mostra a Figura 4.17(a). Os demais discos apresentaram fissuras concentradas mais ao centro geométrico da amostra, como pode ser visto na Figura 4.17(b).

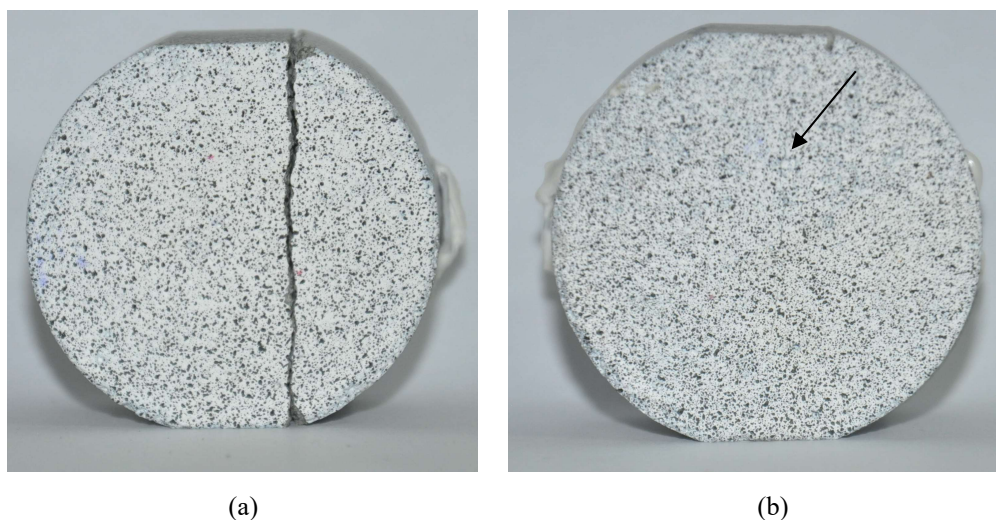


Figura 4.17 - Fissuras do ensaio brasileiro com aplicação de carga sobre chanfros (a) fissura originando a partir da ponta do chanfro, devido imperfeições no corte. (b) Fissura surgindo no centro do disco.

As demais fissuras obtidas nas outras formas de aplicação de carga estão apresentadas no anexo C.

4.2 Discussão geral sobre os resultados experimentais obtidos das seis formas de aplicação de carga

A Tabela 4.3 mostra os valores analíticos e experimentais estimados de resistência à tração dos ensaios brasileiros em um disco de argamassa cimentícia. Os resultados analíticos foram calculados a partir das equações (2.2) e (2.4) para carga concentrada e distribuída, respectivamente, na região central do disco.

Tabela 4.3 - Resultados analíticos e experimentais da resistência à tração de cinco configurações de aplicação de carga.

Aplicação de carga	Soluções Analíticas		Norma ASTM	Desvio
	Valores de entrada	σ_t (MPa)	σ_t (MPa)	(%)
Direta	eq (2.2)	3,46	3,46	0
Ripas madeira	eq (2.4), $2\alpha = 0,20$ rad	4,06	4,12	1,48
Tiras papelão	eq (2.4), $2\alpha = 0,20$ rad	3,86	3,64	5,70
Mordentes de aço	eq (2.4), $2\alpha = 0,26$ rad	3,33	2,15	35,43
Barras de aço	eq (2.2)	2,26	2,26	0

A solução analítica para estimar a resistência à tração com o uso de chanfros é proposta por Wang (2004):

$$\sigma_t = \left\{ \frac{\left(2\cos^3\alpha + \cos\alpha + \frac{\text{sen}\alpha}{\alpha} \right)^2}{8 \left(\cos\alpha + \frac{\text{sen}\alpha}{\alpha} \right)} \frac{\alpha}{\text{sen}\alpha} \right\} \frac{2P}{\pi Dt} \quad (4.1)$$

A Tabela 4.4 traz uma comparação entre o resultado analítico e experimental da resistência à tração da condição de aplicação de carga sobre chanfros obtida através da equação (3.2) que aborda um valor de k já estipulado para chanfros com ângulo de 30 graus, e a equação (4.1) que o valor de k está por extenso e calculado com o α utilizado no trabalho.

Tabela 4.4 - Resultado analítico e experimental da resistência à tração com aplicação de carga sobre chanfros.

Chanfros	k calculado eq (4.1)		k = 0,92 eq (3.2)	Desvio
	Valor de entrada	σ_t (MPa)	σ_t (MPa)	(%)
	$\alpha = 0,26$ rad	3,86	4,03	4,40

As configurações de ensaio com ripas de madeira, tiras de papelão e chanfros tiveram um desvio de 1,48%, 5,70% e 4,40%, respectivamente, o que pode ser considerado aceitável.

Já a resistência obtida de acordo com a norma na condição de aplicação de carga por meio de mordentes de aço apresentou um desvio de 35,43% em relação ao resultado analítico, o que indica que a expressão da norma não representa o experimento para a geometria de estudo.

A Tabela 4.5 traz uma avaliação das seis formas de aplicação de carga do ensaio brasileiro referente a montagem do corpo de prova, a execução do ensaio e os resultados obtidos. Este último considera se o surgimento da fissura se dá conforme a teoria de Griffith, ou seja, originando no centro do disco. A avaliação consiste em notas que variam de 1 a 5, sendo que 1 significa ruim e 5, ótimo.

Tabela 4.5 - Avaliação referente a montagem, execução e resultados das seis configurações de aplicação de carga do ensaio brasileiro.

Aplicação de carga	Preparação	Execução	Resultados
Direta	5	5	4
Ripas madeira	4	5	4
Tiras papelão	4	5	5
Mordentes de aço	5	3	2
Barras de aço	4	3	4
Chanfros	2	5	4

Quando o quesito montagem é analisado os mais fáceis de confeccionar são os discos moldados para aplicação direta de carga e para o uso de mordentes de aço, pois não requer nenhuma mudança na estrutura do disco, somente precisa ser desmoldado. Já no caso dos chanfros, há necessidade de corte e o caso de ripas de madeira e tiras de papelão requer a colagem de peças. O disco para ser ensaiado com aplicação de carga por meio de barras de aço também não precisa de nenhum método de confecção especial, entretanto precisou-se soldar as barras de aço em uma pequena chapa metálica para dar uma melhor estabilidade para o posicionamento do disco entre as barras. Os corpos de prova ensaiados na condição dos chanfros foram os que tiveram maior dificuldade na preparação, pois a obtenção da geometria é complexa. A análise dos resultados dos ensaios realizados com chanfros mostrou que a confecção do corpo de prova tem uma sensibilidade muito alta, pois qualquer imperfeição é responsável pelo acúmulo de tensões nessa região e consequentemente pelo surgimento da fissura nesse local.

A avaliação da execução dos ensaios brasileiros mostrou que a aplicação direta de carga, por meio de ripas de madeira, através de tiras de papelão e sobre chanfros, depois dos discos serem confeccionados não apresentaram dificuldades para a realização do ensaio, sendo necessário somente o posicionamento da amostra no centro da máquina. Porém, o ensaio com mordentes de aço e barras de aço apresentaram maior dificuldade no posicionamento e acomodação do disco entre as

peças. Observou-se que qualquer deslize do corpo de prova pode alterar no resultado experimental.

Levando em conta o surgimento e propagação de fissuras, o ensaio que teve uma melhor avaliação foi o com uso de tiras de papelão, pois a fissura começou a se propagar na região central do disco. Na condição de aplicação de carga sobre os chanfros, a fissura também abriu no centro do disco. Nos ensaios brasileiros realizados com aplicação de carga direta, por meio de ripas de madeira ou barras de aço, as fissuras não originaram no meio da amostra. Este também foi o caso do ensaio efetuado com o uso de mordentes de aço.

Depois de uma análise completa dos resultados experimentais das seis formas de aplicação de carga, conclui-se que o ensaio mais indicado é o com uso de tiras de papelão.

5

Resultados numéricos

Nesse capítulo investigam-se por meio de modelos numéricos as diferenças nos campos de tensão e deformação introduzidas por diferentes condições de contorno. Por meio dessa análise busca-se discutir as diferenças observadas nos ensaios. Para tal, foram escolhidas duas formas de aplicação de carga, a aplicação direta para representar a condição de carga concentrada, e com o uso de mordentes de aço para representar a condição de carga distribuída. Os resultados numéricos obtidos foram comparados com os resultados experimentais de sua respectiva forma de aplicação de carga.

Os modelos numéricos foram desenvolvidos utilizando o programa comercial de elementos finitos Abaqus. A discretização considera elementos isoparamétricos quadrilaterais combinados com elementos de interface entre suas arestas. Para os elementos de contínuo considera-se um modelo linear elástico. Para os elementos de interface o modelo constitutivo empregado combina a fase elástica, utilizando as propriedades obtidas experimentalmente, com um modelo de dano. O elemento de interface utilizado na simulação numérica foi inicialmente proposto por Goodman, Taylor, and Brekke (1968) e apresenta espessura nula. O emprego desse elemento tem como objetivo representar o comportamento das fraturas coesivas, tal como indicar explicitamente o seu início e a sua propagação das mesmas. O elemento de interface utilizado foi proposto por Day and Potts (1994), que consideram formulações isoparamétricas com elementos de 4 e 6 pontos nodais, e é consistente com a maioria dos elementos quadrilaterais planos usualmente utilizados em aplicações bidimensionais do método dos elementos finitos.

Os discos foram modelados com elementos quadrilaterais em um sistema bidimensional. As propriedades da amostra utilizadas em ambos os modelos foram módulo de elasticidade igual a 25GPa e o coeficiente de Poisson igual a 0,21, de acordo com os resultados experimentais. As propriedades das chapas metálicas e dos mordentes de aço são de um aço comum, com módulo de elasticidade de 210 GPa e coeficiente de Poisson de 0,3. Para a análise numérica, realizou-se um estudo da malha de três maneiras distintas, variando a região onde os elementos de interface foram implementados. A Figura 5.1 mostra que os elementos de interface

foram aplicados em toda a malha até uma região delimitada por 0,5mm, 1,11mm e 3,00mm distantes da zona de aplicação de carga, respectivamente. Isto foi feito para evitar a abertura precoce de fraturas nessa pequena região, pois percebeu-se que os resultados numéricos, tanto da aplicação direta de carga, quanto com o uso de mordentes de aço, eram sensíveis a essa mudança. Em um modelo linear elástico há tensões muito altas nas regiões onde as fissuras se abrem. Implementando elementos de interface em todo o disco impossibilitou o cálculo do modelo, pois estava concentrando muito o dano na região de aplicação de carga, o que não condiz com a realidade. O ideal seria um modelo elasto-plástico pois, assim, deformações plásticas ocorreriam justamente onde está aplicando a carga. Portanto, deixou-se áreas de 0,5mm, 1,11mm e 3,00mm sem elementos de interface, nas zonas de aplicação de carga, a fim de dissipar a energia nessas áreas.

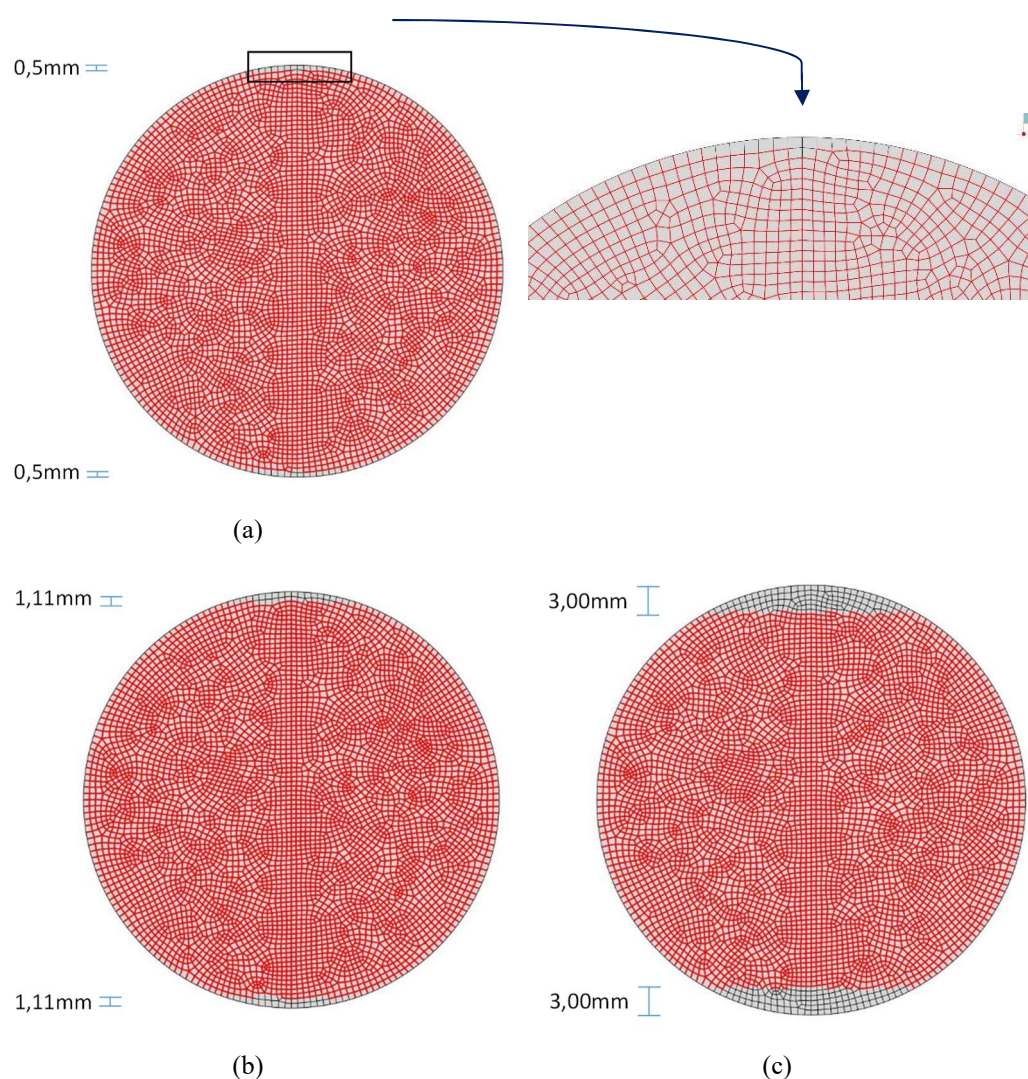


Figura 5.1 - Elemento de interface implementado em toda a malha até uma região delimitada das extremidades do disco em (a) 0,5mm (b) 1,11mm (c) 3,00mm.

Não foi realizado um modelo numérico elasto-plástico devido o limite de tempo para a pesquisa, e pela ideia inicial ter sido uma comparação com as soluções analíticas que preveem que o material seja elástico fraturado.

O modelo constitutivo de dano utilizado na modelagem numérica foi o modelo coesivo com amolecimento exponencial (*displacement e exponential*). A Figura 5.2 mostra a representação do comportamento de um elemento de interface na configuração do modelo de dano escolhido. Esse modelo tem como parâmetros a resistência à tração do material σ_t , a energia de fratura G , abertura efetiva da fissura, coeficiente de inclinação α e rigidez normal K_n dos elementos de interface.

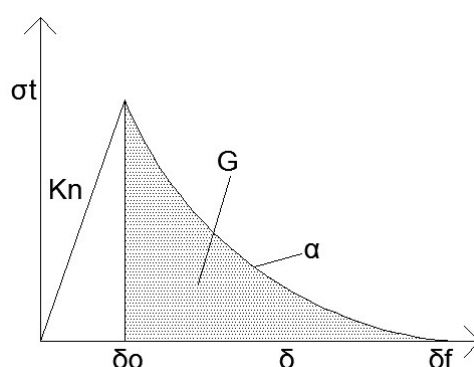


Figura 5.2 - Modelo constitutivo do elemento de interface empregado na análise numérica.

A resistência à tração utilizada nos modelos numéricos foi de 3 MPa. O corpo de prova com argamassa cimentícia ao ser ensaiado em laboratório com aplicação direta de carga e com uso de mordentes de aço teve uma média de resistência à tração igual a 3,46 MPa e 2,15 MPa, respectivamente. Ao utilizar o seu respectivo valor de resistência à tração, em ambas as análises numéricas, tanto a aplicação direta de carga quando o uso de mordentes de aço, tiveram valores distantes dos resultados obtidos experimentalmente. O valor de resistência à tração que mais se aproximou dos resultados experimentais nas duas condições de aplicação de carga modeladas numericamente foi de 3,00MPa e foi a utilizada na análise.

A energia de fratura do material utilizada nos modelos numéricos foi de 0,0068 N/mm. Esse valor foi obtido por meio da equação (5.1), conforme Anderson (2004):

$$G = \frac{K_I^2}{E'} \quad (5.1)$$

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (5.2)$$

Onde o fator de intensidade de tensão (K_I) adotado foi igual a $0.42 \text{ MPa}\sqrt{m}$ sugerido por Wang et al. (2013), o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson empregados foram obtidos pelo ensaio de compressão uniaxial, igual a 25.000 MPa e 0,21, respectivamente.

O valor da abertura efetiva na qual ocorre o processo de degradação do material δ utilizado foi igual a 0,0066mm. Esse valor foi obtido por meio da elaboração de uma rotina que calcula ponto a ponto da curva exponencial, baseada nas equações (5.3) e (5.4), conforme o manual do usuário do programa Abaqus:

$$\sigma_t = (1 - d)K_n\delta \quad (5.3)$$

$$d = 1 - \left\{ \frac{\delta_o}{\delta} \right\} \left\{ 1 - \frac{1 - \exp\left(-\alpha\left(\frac{\delta - \delta_o}{\delta_f - \delta_o}\right)\right)}{1 - \exp(-\alpha)} \right\} \quad (5.4)$$

$$\delta_o = \frac{\sigma_t}{K_n} \quad (5.5)$$

$$\delta_f = \delta_o + \delta \quad (5.6)$$

Onde a resistência à tração σ_t é igual a 3 MPa, d é o dano do modelo constitutivo, o parâmetro α utilizado é igual a 2, uma vez que foi o valor mais adequado para o ajuste da curva numérica e a rigidez normal adotada para os elementos de interface foi K_n igual a $2,5 \cdot 10^7$ MPa, 1000 vezes o valor do módulo de elasticidade do disco.

Para a leitura de abertura de fissura dos corpos de prova modelados numericamente, escolheram-se dois pontos médios que representaram as placas metálicas utilizadas para posicionar o *clip gage* durante os ensaios experimentais. Com esses pontos foi possível montar os gráficos de resistência à tração *versus* abertura do *clip gage* para a análise dos resultados numéricos. A Figura 5.3 mostra os pontos utilizados para o cálculo da abertura de fissura.

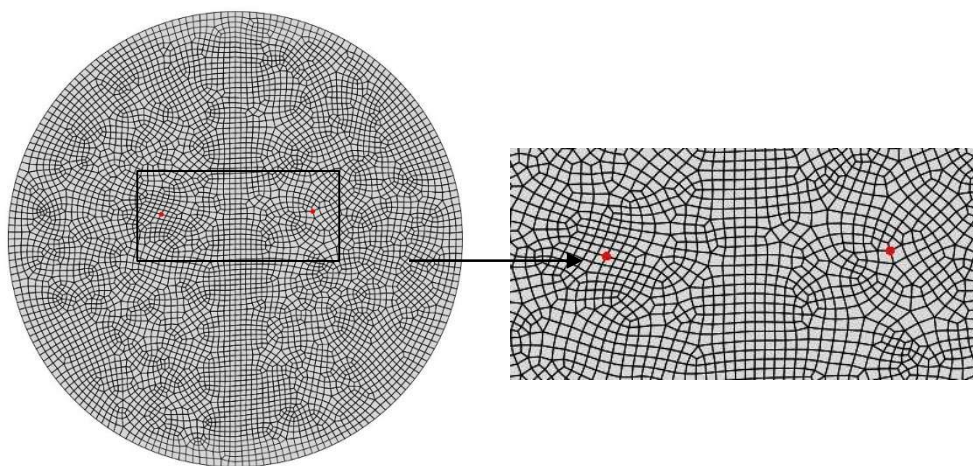


Figura 5.3 - Pontos médios utilizados para a leitura de abertura de fissura no modelo numérico.

5.1 Aplicação direta de carga

O modelo numérico da condição de aplicação direta de carga utilizou a geometria descrita no capítulo 3. A malha adotada está representada na Figura 5.4. Os elementos da malha são quadrangulares com 4 pontos de integração (Q4).

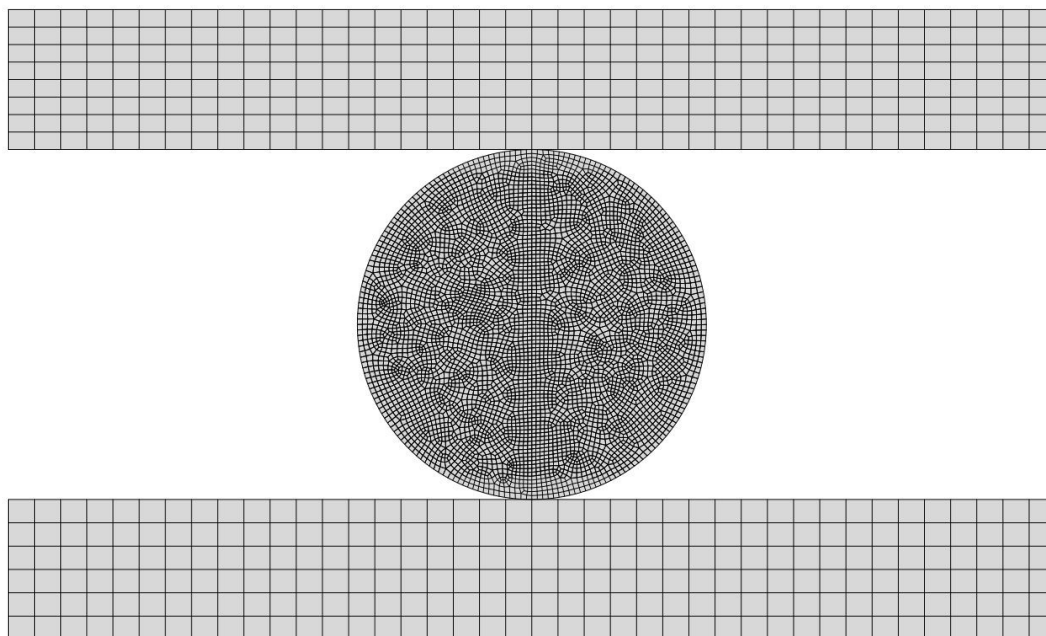


Figura 5.4 - A malha do disco foi dividida nas bordas em 200 unidades, e na linha central em 90 unidades. A malha das chapas metálicas foi dividida em 40x5 unidades.

A Figura 5.5 mostra o gráfico de σ_t versus abertura de fissura de todos os resultados experimentais válidos para a condição de aplicação direta de carga em comparação com os resultados numéricos obtidos com elementos de interface em toda a malha até as regiões de 0,5mm, 1,11mm e 3,00mm nas extremidades do disco.

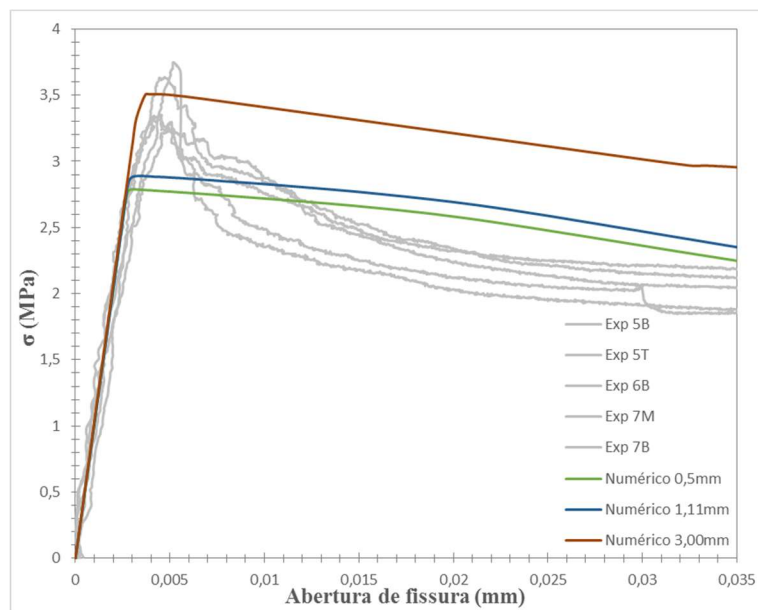


Figura 5.5 - Gráfico tensão *versus* abertura de fissura da condição de aplicação direta de carga com resultados experimentais e numéricos.

Por meio da comparação dos resultados numéricos obtidos com elementos de interface em todo o disco até as regiões de 0,5mm, 1,11mm e 3,00mm distantes da aplicação de carga, com os valores experimentais, conclui-se que a malha com 3,00mm é a que mais está próxima dos valores obtidos experimentalmente, pois foi a que melhor dissipou a energia gerada na zona de aplicação de carga.

Foi realizado um estudo de sensibilidade da malha do disco, a fim de analisar o impacto que a discretização da malha proporcionava no resultado numérico. O corpo de prova escolhido foi aquele cujos elementos de interface estão presentes em todo o disco até uma região de 3,00mm distantes das extremidades do disco. Dividiu-se o corpo de prova em três malhas, menos refinada, intermediária e mais refinada, conforme mostra a Figura 5.6. A malha menos refinada apresenta 4178 elementos Q4, a malha intermediária apresenta 15146 elementos Q4 e a malha mais refinada apresenta 61912 elementos Q4. Os resultados obtidos dessa comparação estão apresentados no gráfico da Figura 5.7.

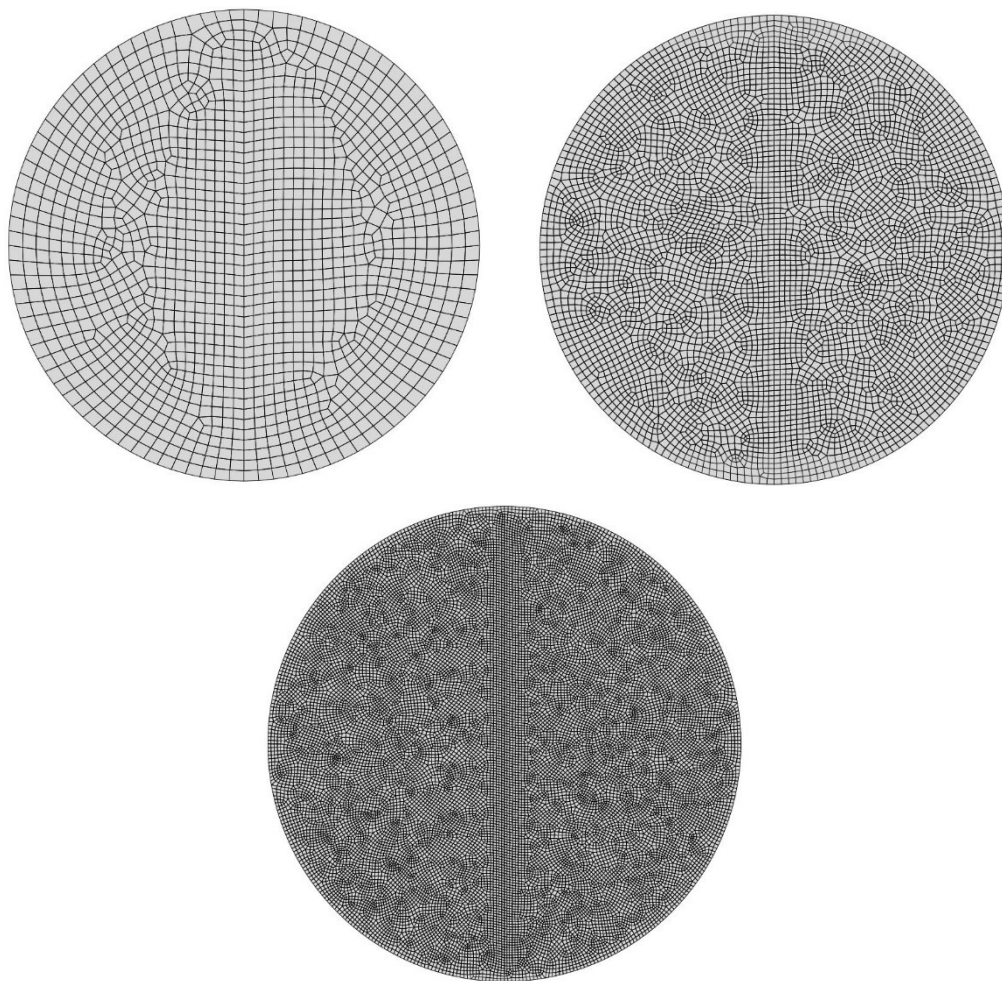


Figura 5.6 - Esquema de modelos das malhas menos refinada, intermediária e mais refinada, respectivamente.

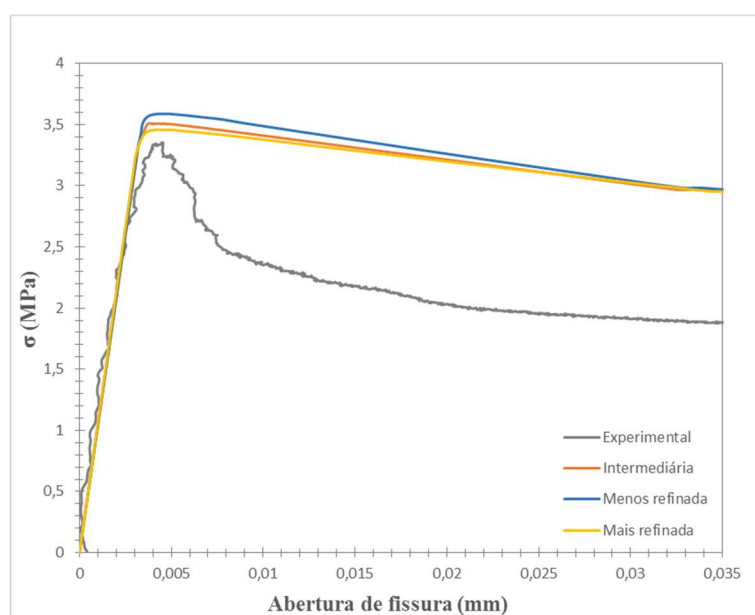


Figura 5.7 - Gráfico tensão *versus* abertura de fissura da sensibilidade numérica da malha da condição de aplicação direta de carga.

Por meio do estudo de sensibilidade realizado e da comparação das regiões de implementação dos elementos de interface, escolheu-se a malha intermediária e

com elementos de interface até uma região de 3,00mm distantes das extremidades do disco onde optou-se por uma malha padrão a ser utilizada na modelagem numérica.

Para enriquecer a análise, fez-se uma comparação utilizando a malha padrão com dois tipos de elementos distintos, o padrão com 15146 elementos Q4 e uma malha com 21810 elementos triangulares T3. O resultado da comparação está descrito na Figura 5.8.

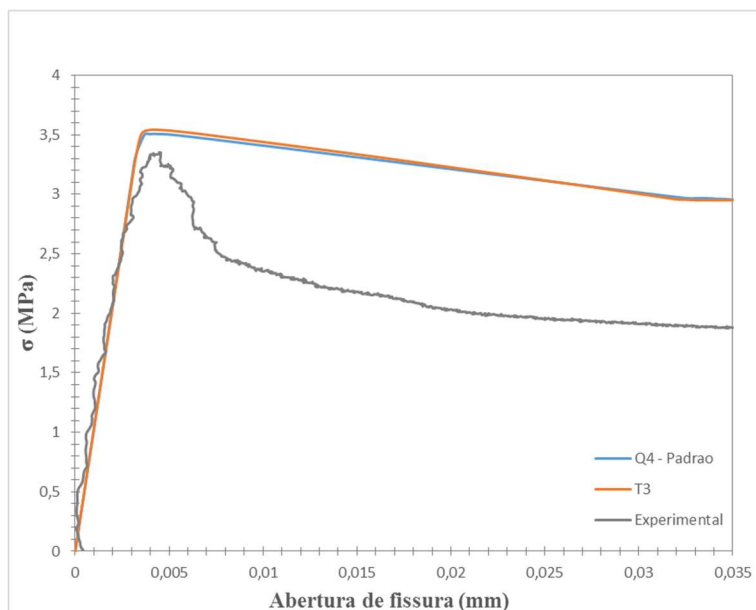


Figura 5.8 - Gráfico tensão *versus* abertura de fissura da comparação entre elementos quadrangulares e triangulares da condição de aplicação direta de carga.

Realizou-se um teste que consiste em modelar a condição de aplicação direta de carga de duas maneiras distintas. A primeira com a modelagem das chapas metálicas representando os “pratos” de aplicação de carga da máquina, e a segunda sem as chapas metálicas, idealizando uma aplicação direta de carga na prática. Vale ressaltar que esse modelo só pode ser realizado numericamente, pois em ensaio experimental não se consegue fixar o disco em um único ponto e tampouco aplicar a carga em um único ponto. A malha utilizada na análise foi a intermediária, porém variou-se a região de implementação dos elementos de interface. As representações desses modelos estão ilustradas conforme mostram a Figura 5.9 e a Figura 5.10, respectivamente. Os resultados obtidos dessa comparação estão expressos no gráfico da Figura 5.11.

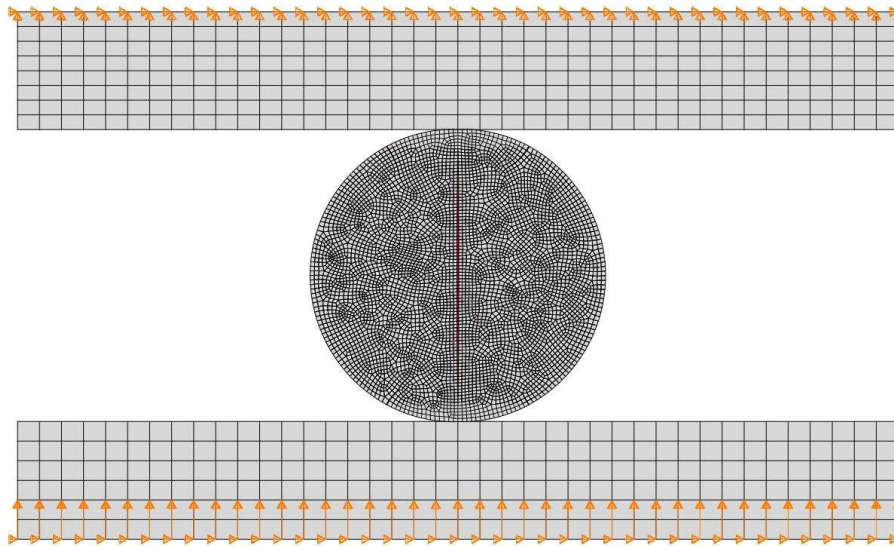


Figura 5.9 - Modelagem numérica da condição de contorno de aplicação direta de carga com as chapas metálicas. Também está sendo evidenciado os apoios e a aplicação do deslocamento.

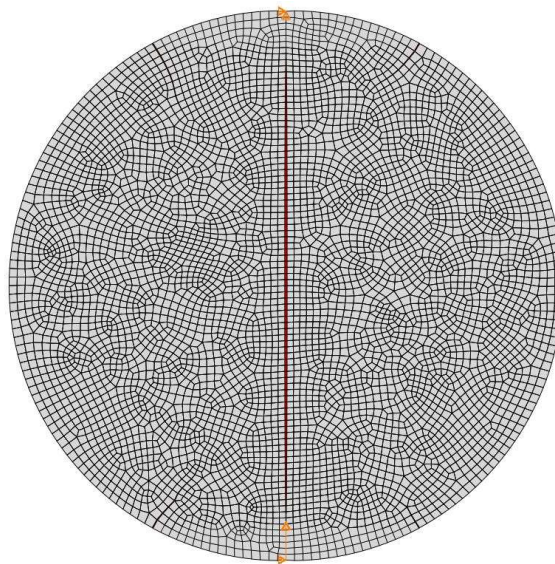


Figura 5.10 - Modelagem numérica da condição de contorno de aplicação direta de carga sem as chapas metálicas. Também está sendo evidenciado os apoios e a aplicação do deslocamento.

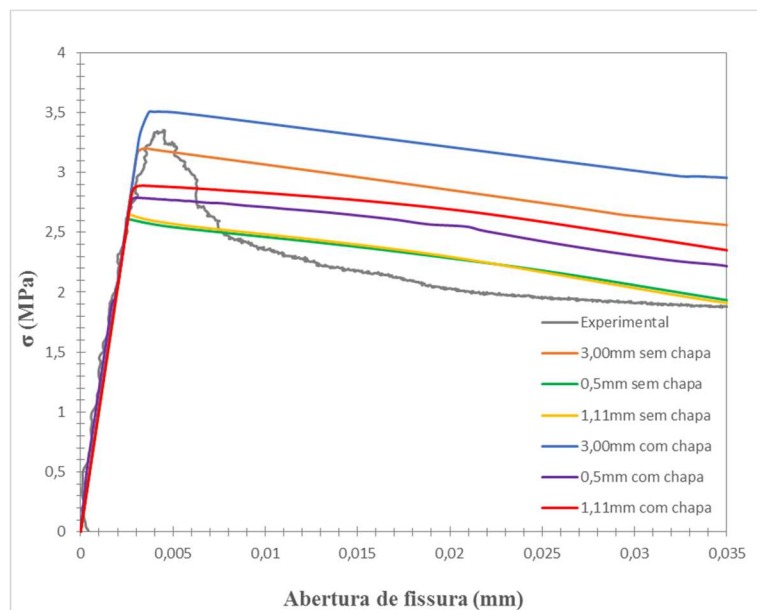


Figura 5.11 - Comparação do resultado numérico entre o modelo com chapas metálicas e sem chapas metálicas.

Foi computado no gráfico a curva característica de um disco ensaiado experimentalmente na condição de aplicação direta de carga para realizar a comparação numérica entre a aplicação direta de carga com e sem as chapas metálicas. E os resultados mostraram que o valor que mais se aproximou do resultado experimental foi o sem as chapas metálicas com elementos de interface em todo o disco até uma região de 3,00mm distantes da extremidade.

Para a visualização do crescimento da fissura os estágios analisados foram os mais representativos, ou seja, os estágios que continham uma mudança significativa de um estágio anterior para o atual. Os traços representados nessas evoluções indicam a localização de abertura da fissura onde os elementos de interface vão abrindo. Os estágios apresentam abertura de fissura de 0,0025mm, 0,0027mm, 0,0029mm, 0,0032mm e 0,025mm para a aplicação direta de carga com chapas metálicas, e 0,0025mm, 0,0027mm, 0,0029mm, 0,0031mm e 0,0215mm para a aplicação direta de carga sem chapas metálicas. A evolução das fissuras está representada na Figura 5.12 e na Figura 5.13.

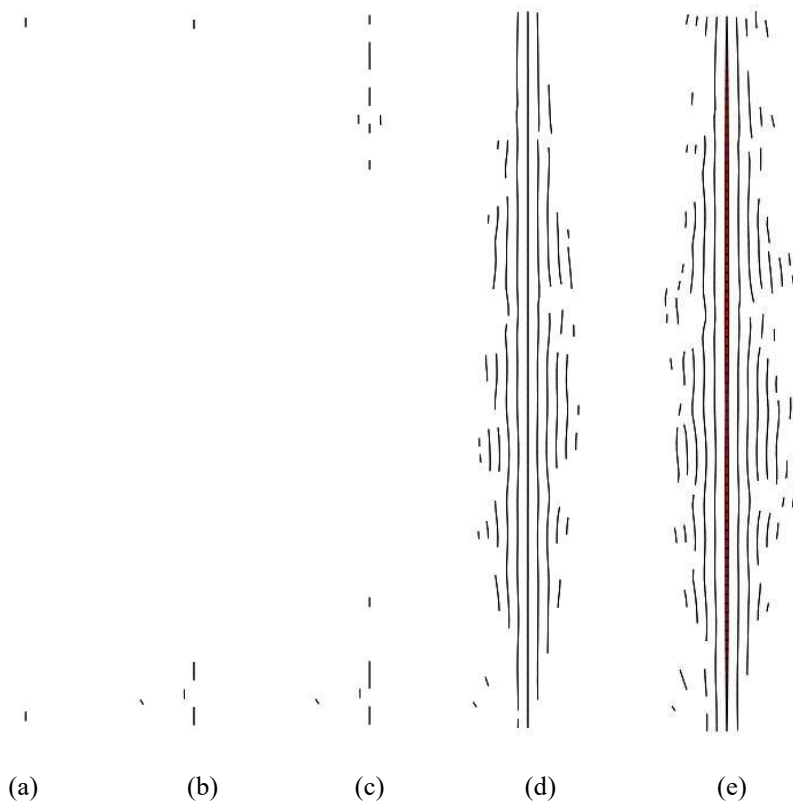


Figura 5.12 - Crescimento da fissura na condição de aplicação direta de carga com chapas metálicas, com abertura de fissuras de (a) 0,0025mm, (b) 0,0027mm, (c) 0,0029mm, (d) 0,0032mm e (e) 0,025mm, respectivamente.

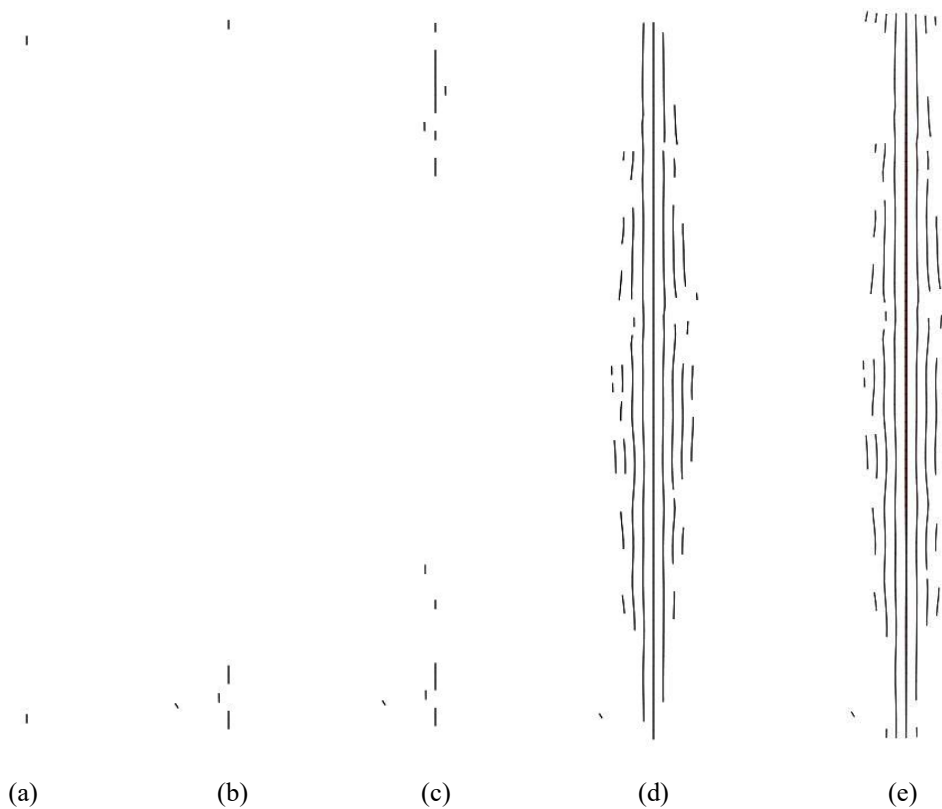
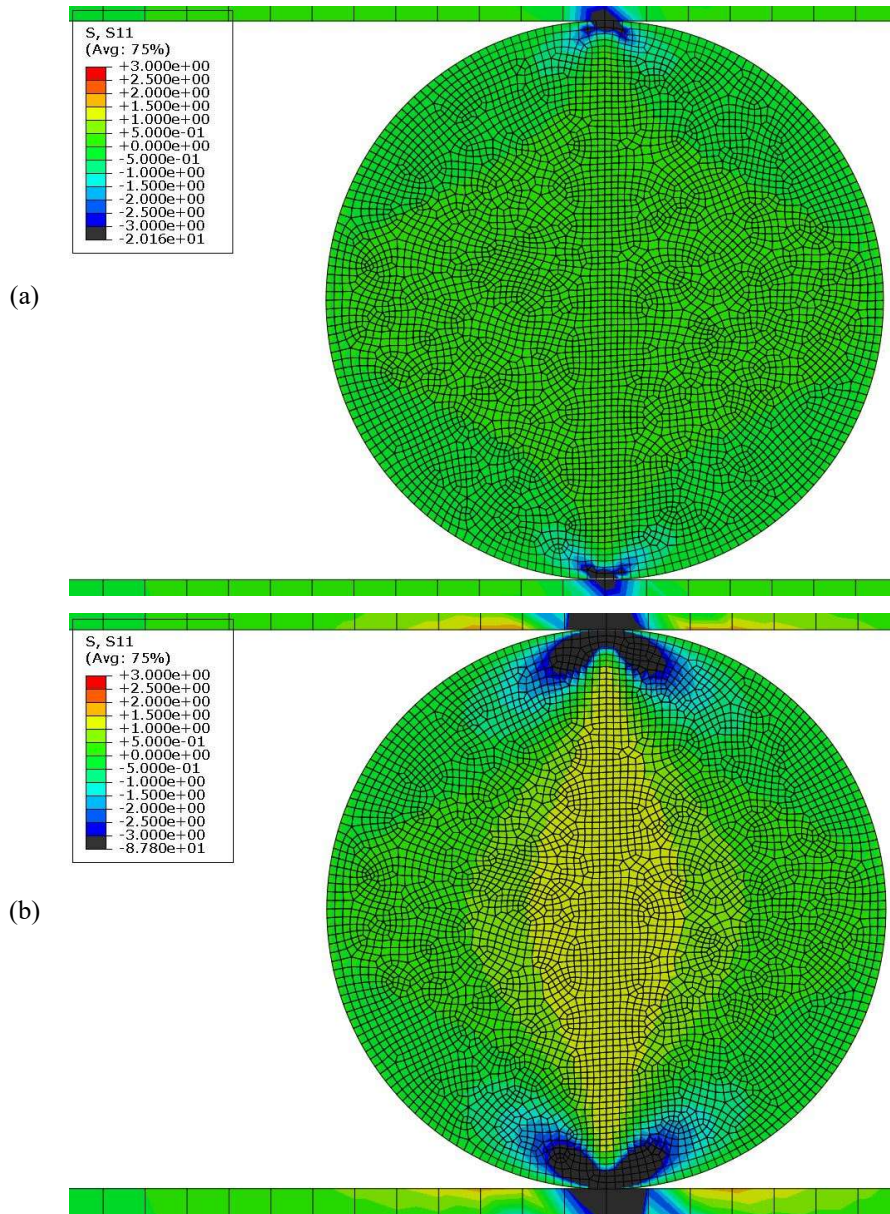
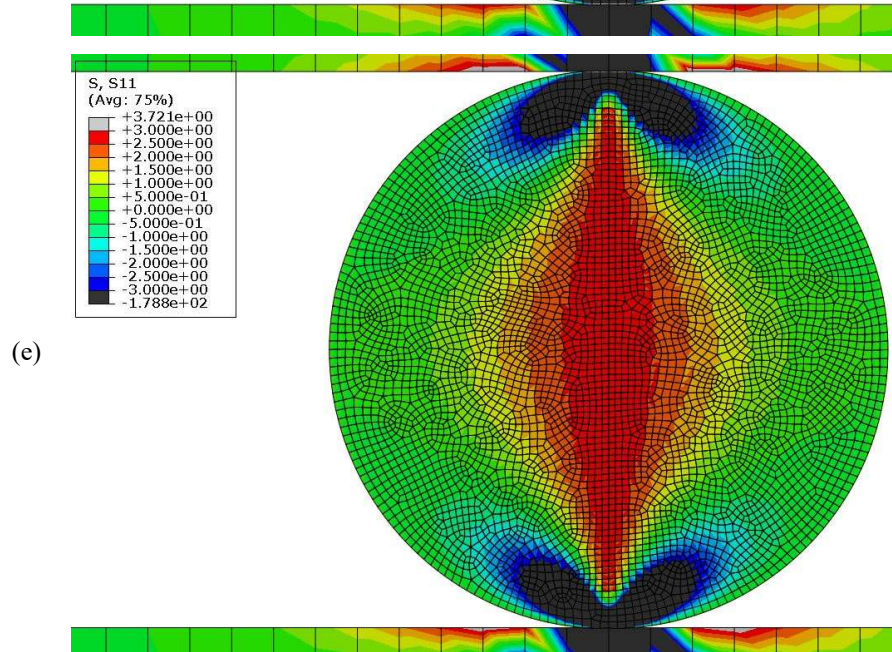
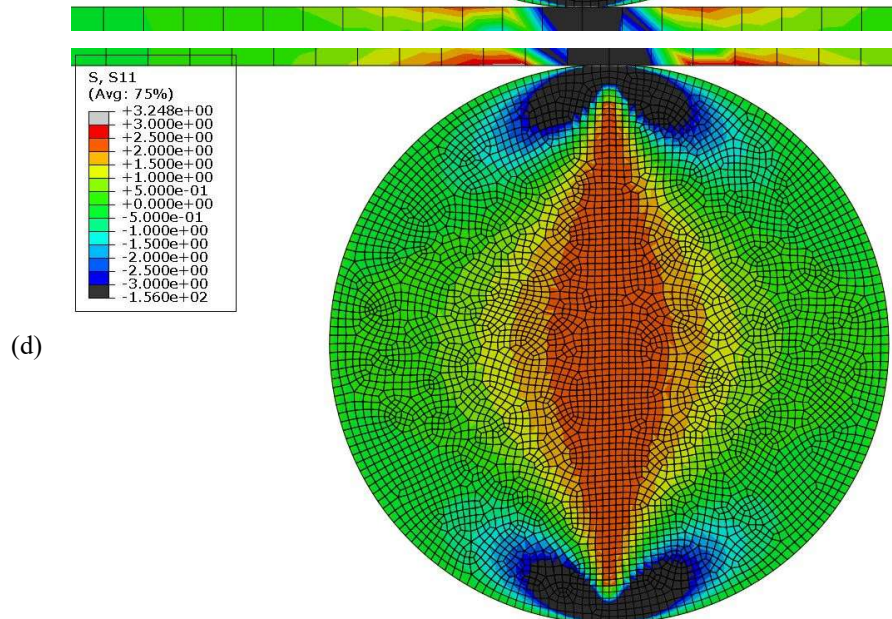
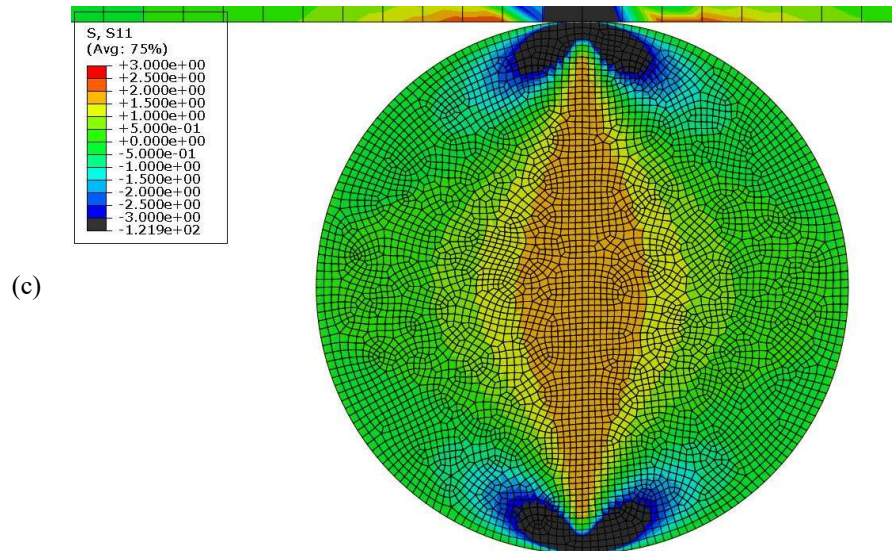


Figura 5.13 - Crescimento da fissura na condição de aplicação direta de carga sem chapas metálicas, com abertura de fissuras de (a) 0,0025mm, (b) 0,0027mm, (c) 0,0029mm, (d) 0,0031mm e (e) 0,0215mm, respectivamente.

Com a análise das propagações das fissuras percebeu-se que elas acontecem de forma concentrada, na aplicação direta com e sem chapas metálicas.

Para a realização do estudo da evolução e distribuição das tensões de tração no eixo horizontal, no centro do disco, escolheu-se a malha padrão. A Figura 5.14 representa as tensões horizontais do disco e sua evolução da condição de aplicação direta de carga com chapas metálicas. Na Figura 5.15 estão representadas as tensões horizontais do modelo sem as chapas metálicas.





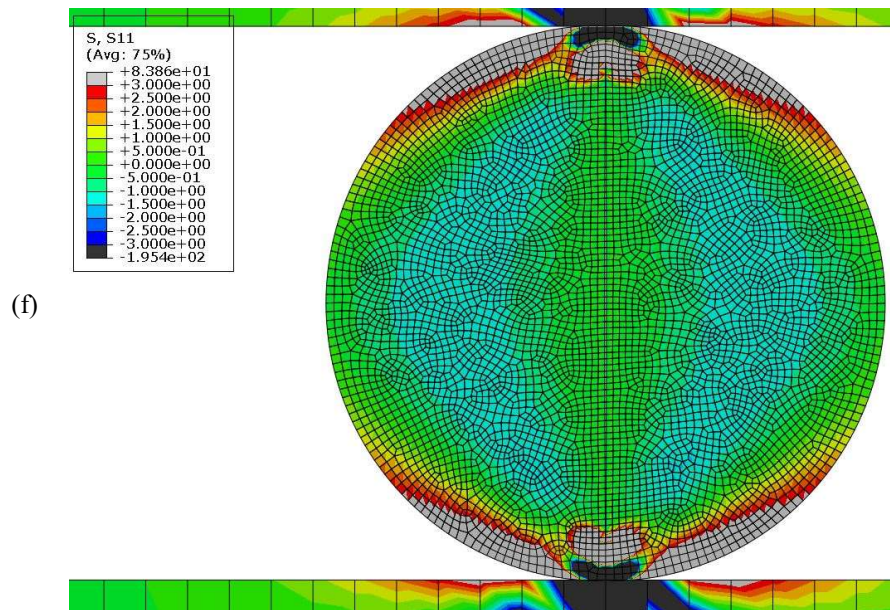
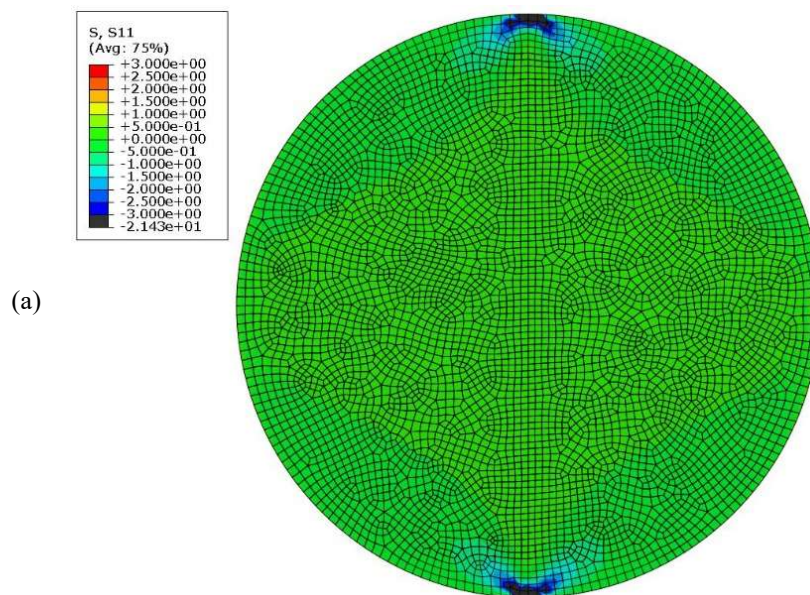
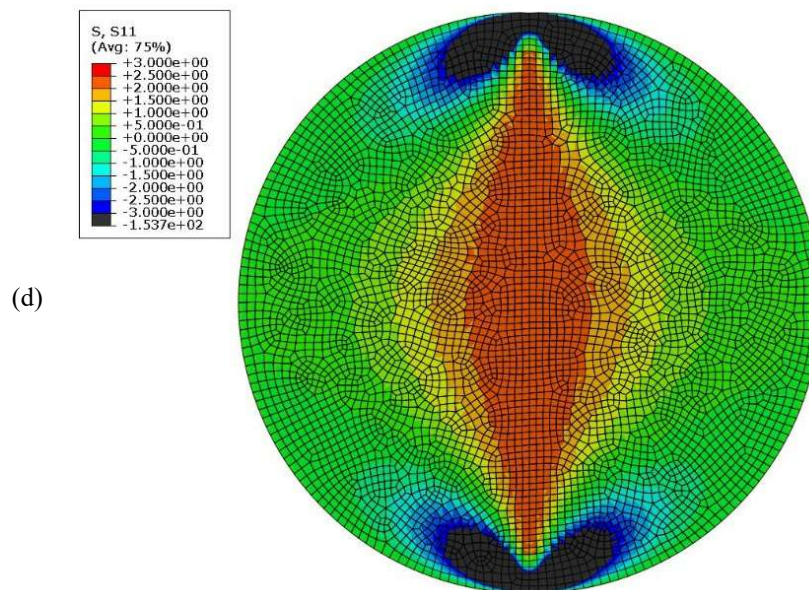
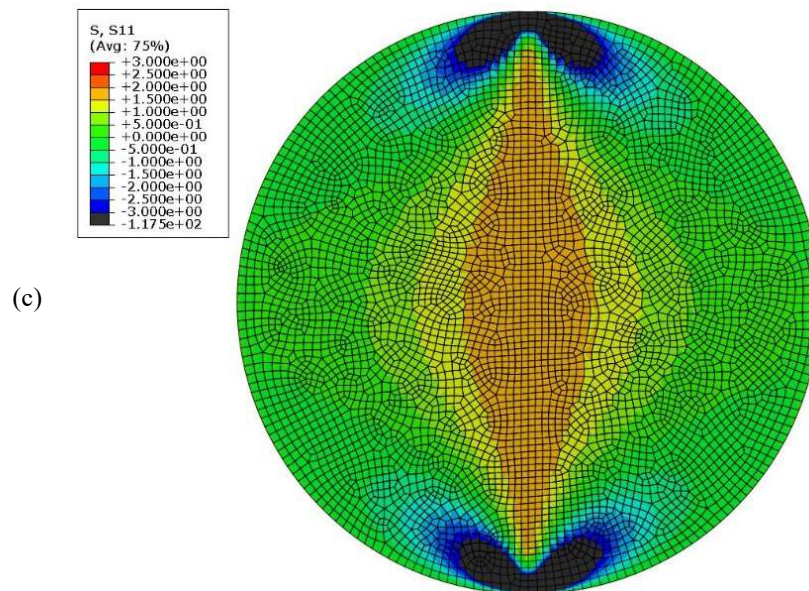
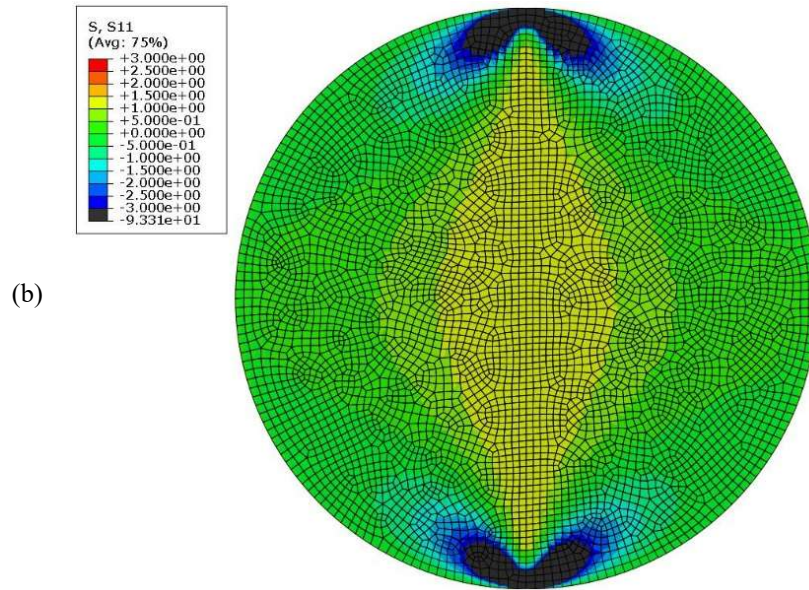


Figura 5.14 - Tensão horizontal com aplicação direta de carga com chapas metálicas no momento de abertura de fissura (a) 0,0003mm (b) 0,0013mm (c) 0,0018mm (d) 0,0023mm (e) 0,0027mm (f) 0,033mm.





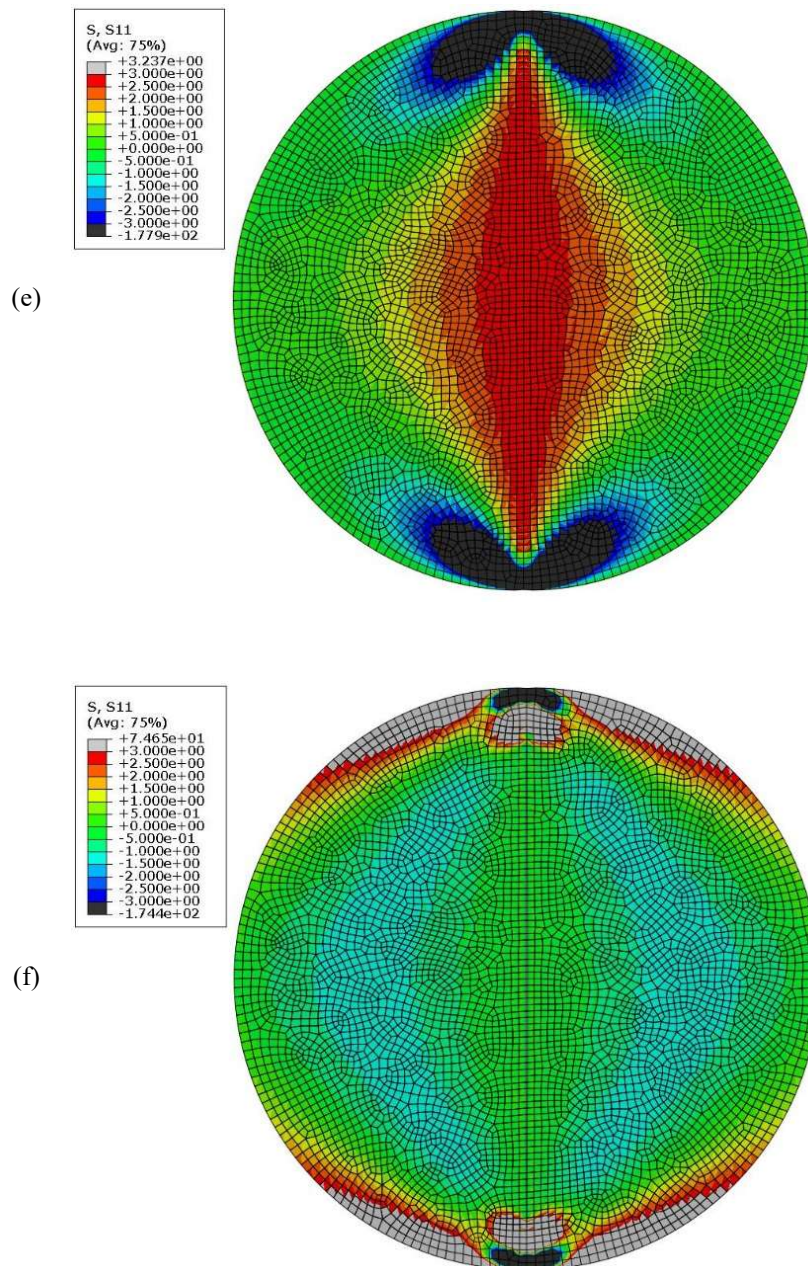


Figura 5.15 - Tensão horizontal com aplicação direta de carga sem chapas metálicas no momento de abertura de fissura (a) 0,00032mm (b) 0,0014mm (c) 0,0018mm (d) 0,0023mm (e) 0,0027mm (f) 0,0293mm.

Investigou-se ainda como o dano se desenvolve nos elementos de interface ao longo do diâmetro do disco. O dano varia de 0 a 1, e quando ele atinge o valor de 1, a abertura de fissura se torna visível na malha. Pôde-se acompanhar a evolução do dano no disco para a condição de contorno com aplicação direta de carga com chapa metálica, conforme mostra a Figura 5.16 e sem as chapas metálicas, conforme a Figura 5.17.

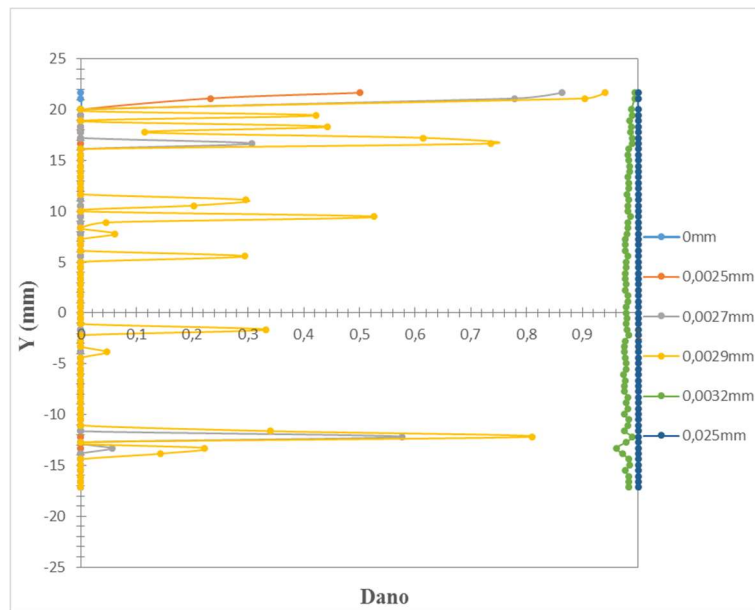


Figura 5.16 - Evolução do dano ao longo do diâmetro do disco com aplicação direta de carga com chapas metálicas.

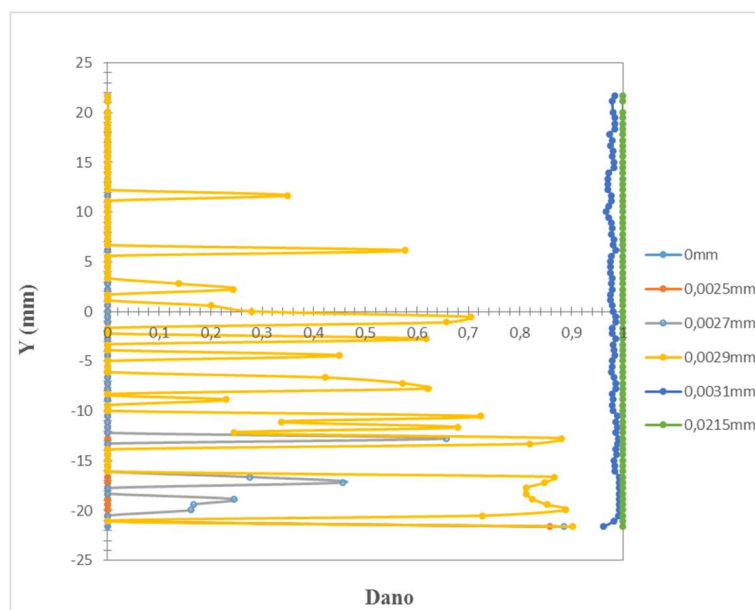


Figura 5.17 - Evolução do dano ao longo do diâmetro do disco com aplicação direta de carga sem chapas metálicas.

5.2 Aplicação de carga com o uso de mordentes de aço

O modelo numérico da condição de aplicação de carga com o uso de mordentes de aço utilizou a geometria descrita no capítulo 3. A malha discretizada está representada na Figura 5.18. Os elementos da malha são quadrangulares com 4 pontos de integração (Q4).

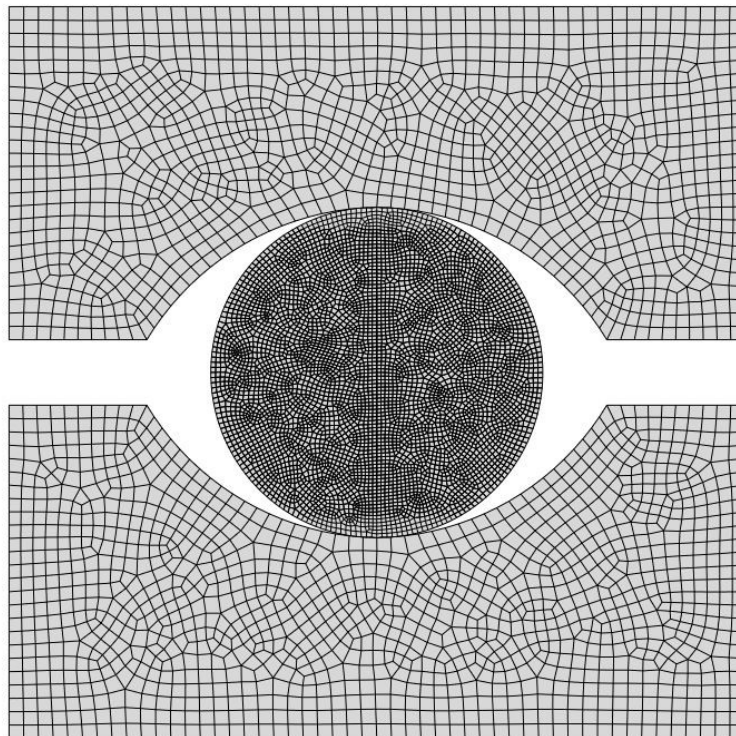


Figura 5.18 - A malha do disco foi dividida nas bordas em 200, e na linha central em 90. A malha das garras de aço foi dividida em 40 partes no arco em contato com o disco.

A Figura 5.19 mostra o gráfico de tensão *versus* abertura de fissura de todos os resultados experimentais válidos com o uso de mordentes de aço em comparação aos resultados numéricos obtidos, com elementos de interface em toda a malha até 0,5mm, 1,11mm e 3,00mm distantes das extremidades do disco.

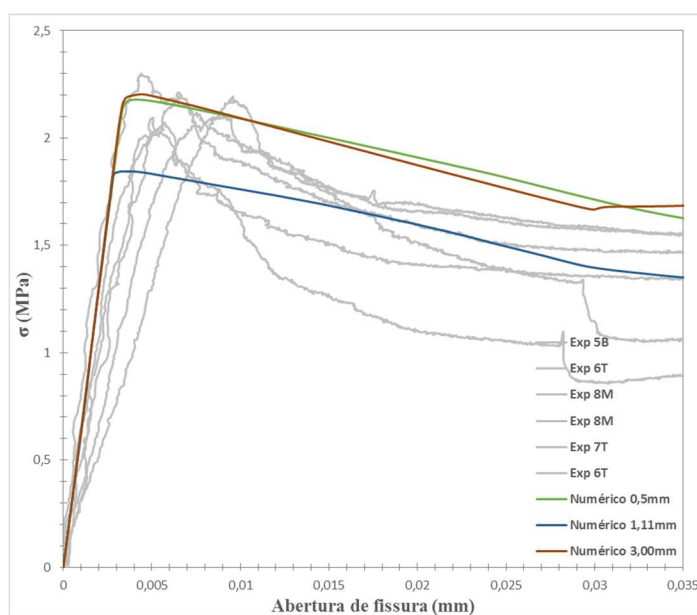


Figura 5.19 - Gráfico tensão *versus* abertura de fissura da comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e numericamente da condição de aplicação de carga com o uso de mordentes de aço.

Por meio da comparação dos resultados obtidos numericamente com os resultados experimentais, percebeu-se que os valores com a implementação de elementos de interface em toda a região do disco até uma região de 0,5mm e 3,00mm distantes da aplicação de carga foram bem próximos. Quando se usou a malha de 0,5mm livres de elementos de interface próxima a zona de aplicação de carga, fez com que o disco perdesse simetria e quando começou a romper, o disco deslocou e ficou solto. Isso aconteceu mesmo utilizando iguais condições para prender o disco nas peças metálicas nas malhas de 1,11mm e 3,00mm livres de elementos de interface nas bordas. Com a malha de 3,00mm livres de elementos de interface próxima a zona de aplicação de carga, fez-se com que a energia se dissipasse melhor. A malha adotada como padrão foi a com 3,00mm.

Foi realizado um estudo de sensibilidade da malha do disco, afim de analisar o impacto que a discretização da malha tem no resultado numérico com essa condição de aplicação de carga. Dividiu-se em três malhas, menos refinada, intermediária e mais refinada, conforme mostra a Figura 5.6. E os resultados obtidos estão apresentados no gráfico da Figura 5.20.

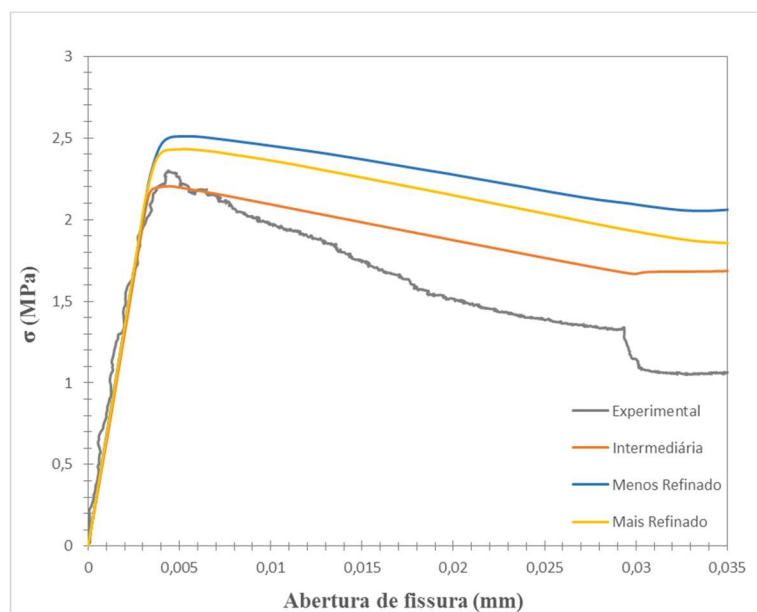


Figura 5.20 - Gráfico tensão *versus* Abertura de fissura da sensibilidade da malha com aplicação de carga por meio de mordentes de aço.

O gráfico evidenciou que a malha intermediária é a que teve um resultado mais próximo ao da curva característica de uma amostra ensaiada experimentalmente e essa malha foi a utilizada no restante da simulação numérica.

A partir da malha padrão pôde-se comparar os tipos de elementos empregados, com 15146 elementos Q4 e com 21810 elementos triangulares T3. O resultado da comparação está descrito na Figura 5.21.

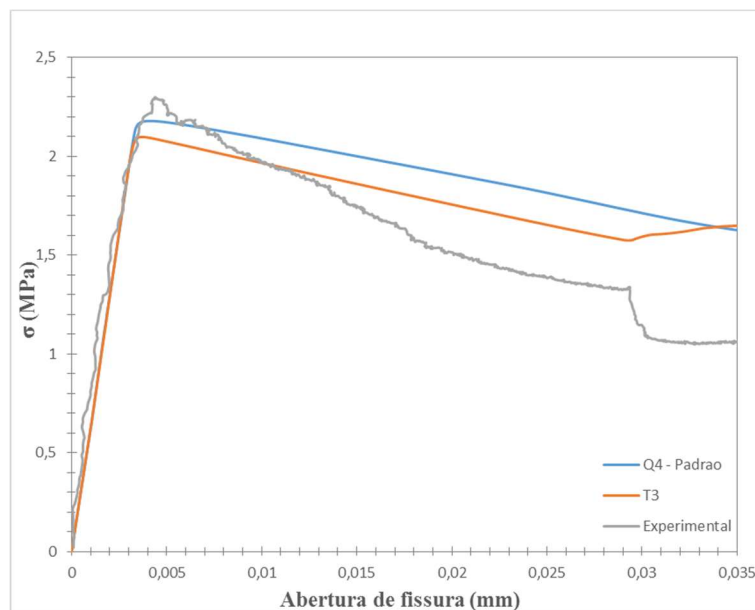


Figura 5.21 - Gráfico tensão *versus* abertura de fissura da comparação entre malhas com elementos quadrangulares e triangulares da condição de aplicação com uso de mordentes de aço.

Para a visualização do crescimento da fissura, escolheu-se o modelo com malha padrão. Os estágios representativos foram com abertura de fissura de 0,0011mm, 0,0023mm, 0,0027mm, 0,0031mm, 0,0032mm e 0,0262mm para a condição de aplicação de carga por meio de mordentes de aço. A evolução das fissuras está representada na Figura 5.22.

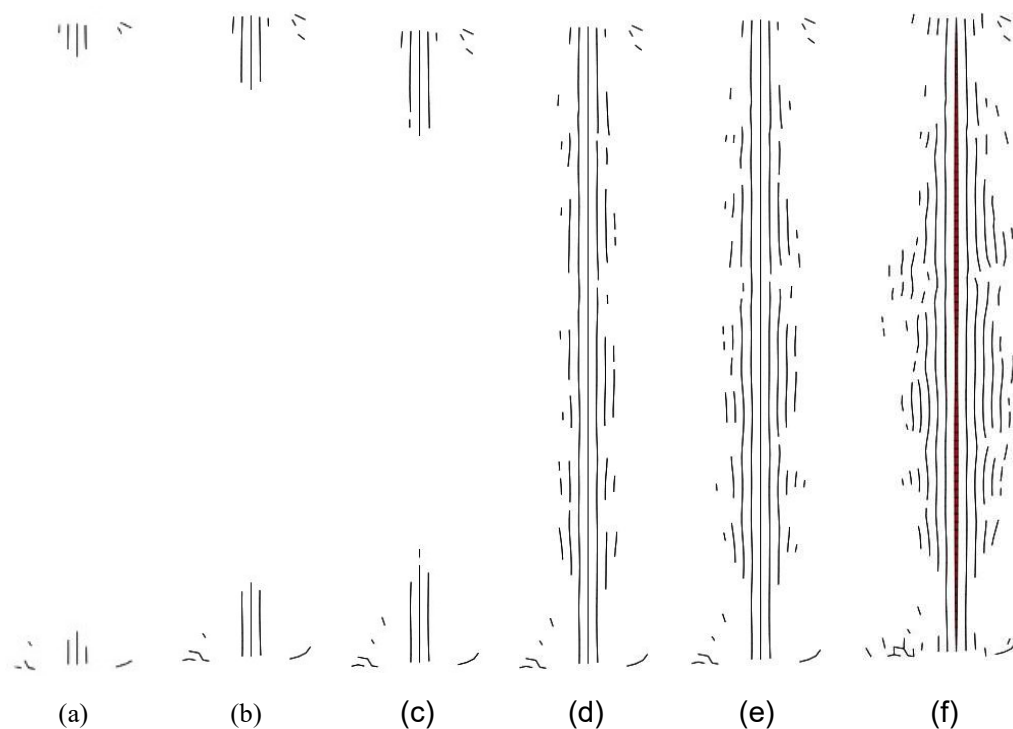
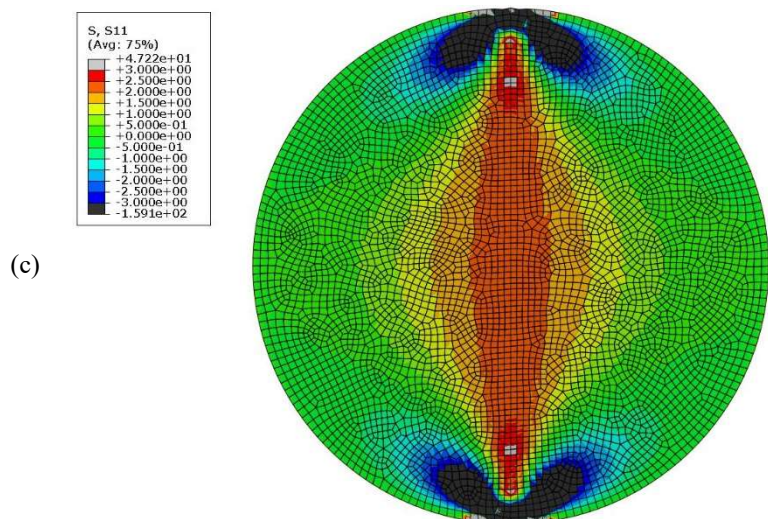
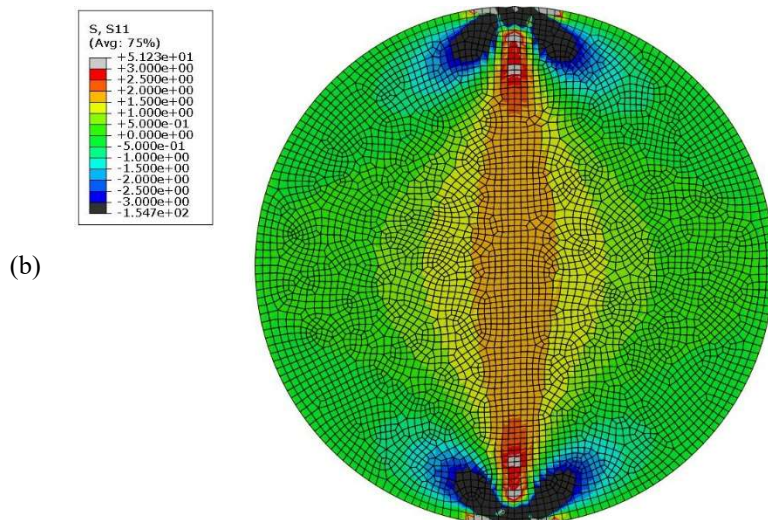
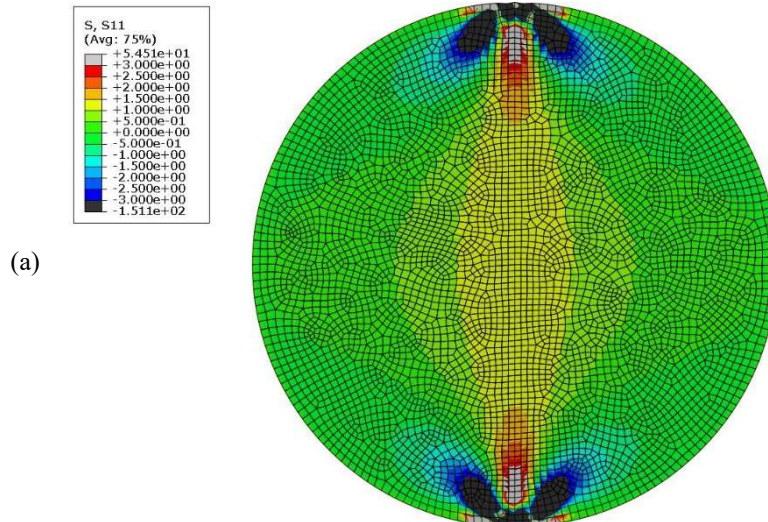


Figura 5.22 - Crescimento da fissura na condição de aplicação de carga com uso de mordentes de aço, nas aberturas de fissura de (a) 0,0011mm, (b) 0,0023mm, (c) 0,0027mm, (d) 0,0031mm, (e) 0,0032mm e (f) 0,0262mm, respectivamente.

Para a realização do estudo da evolução e distribuição das tensões de tração horizontal no centro do disco, escolheu-se os resultados da malha padrão. Na Figura 5.23 estão apresentadas as tensões horizontais do disco e sua evolução para a condição de aplicação de carga com o uso de mordentes de aço.



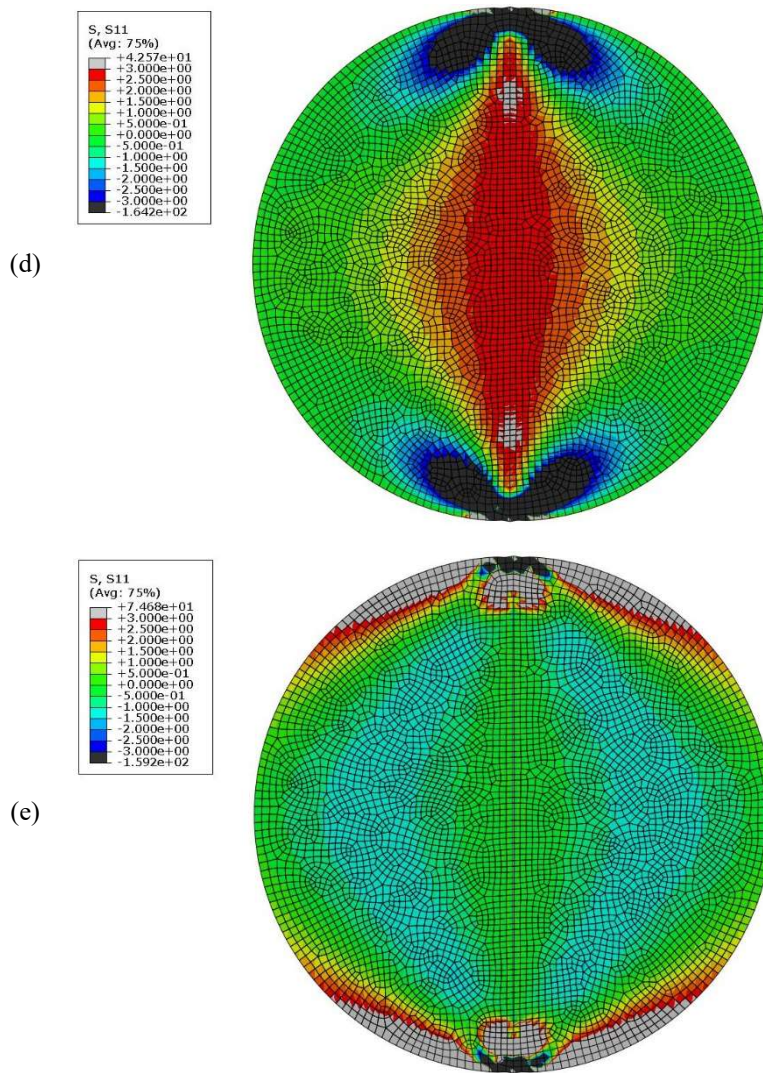


Figura 5.23 - Tensão horizontal com aplicação de carga por meio de mordentes de aço no momento de abertura de fissura (a) 0,0012mm (b) 0,0016mm (c) 0,0021mm (d) 0,0027mm (e) 0,03mm.

Realizou-se o estudo de como o dano dos elementos de interface se desenvolve ao longo do diâmetro do disco. Para esse estudo escolheu-se os resultados da malha padrão.

Pode-se acompanhar a evolução do dano no disco para a aplicação de carga através de mordentes de aço na Figura 5.24.

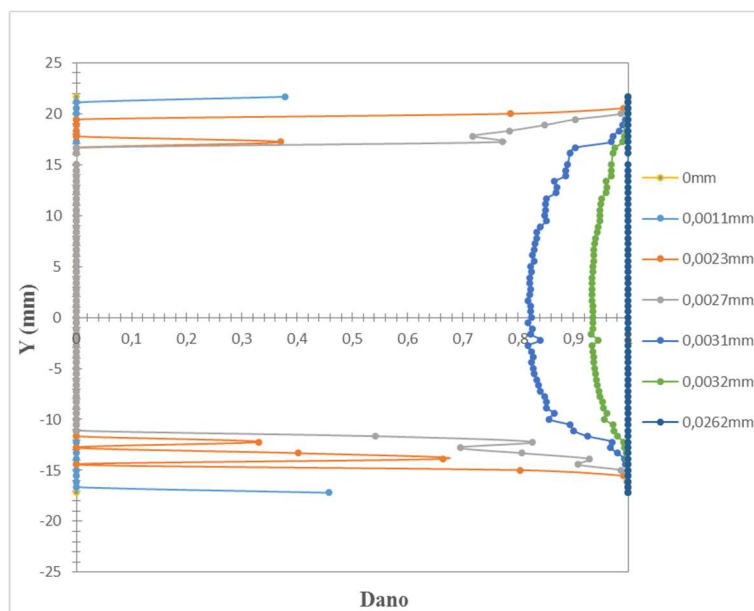


Figura 5.24 - Evolução do dano ao longo do diâmetro do disco com aplicação de carga através de mordentes de aço.

Com a evolução do dano e a representação da propagação das fissuras conclui-se que os resultados numéricos representaram adequadamente o que se obteve nos ensaios experimentais. Foi possível visualizar que há uma concentração inicial de tensões próximo aos pontos de aplicação de carga, onde o corpo de prova começou a ter dano e, posteriormente, as fissuras começam a se propagar de maneira homogênea para o centro do disco.

De forma geral, os resultados experimentais ao serem comparados com os resultados obtidos numericamente, foram considerados bons. A Tabela 5.1 mostra os valores de resistência à tração obtidos experimentalmente e numericamente para aplicação direta de carga e por meio de mordentes de aço.

Tabela 5.1 - Valores analíticos, experimentais e numéricos da resistência à tração das amostras.

Resistência à tração (MPa)			
Aplicação direta de carga (Exp.)	Aplicação direta de carga (Numérico)	Mordentes de aço (Exp.)	Mordentes de aço (Numérico)
3,46	3,50	2,15	2,20

6

Conclusões e sugestões

A condição de aplicação de carga sobre chanfros apresentou uma maior resistência à tração pois apresenta uma maior superfície de contato do disco com a aplicação de carga da máquina e apresenta também uma melhor distribuição das tensões. Já a condição de contorno das barras de aço apresentou uma concentração muito alta de tensões na região de contato com o disco.

Os valores analíticos de resistência à tração para carregamentos concentrados e para carregamentos distribuídos para Lapwood et al. (2007) e Hondros (1959a), são de 3,46 MPa e 3,33 MPa, respectivamente, calculados na região central do disco. Os ensaios experimentais com condição de aplicação direta de carga apresentaram um valor médio de resistência à tração de 3,46MPa, atingindo o valor proposto analiticamente.

A aplicação de carga por meio de mordentes de aço obteve um valor de resistência à tração próximo ao com uso de barras de aço, possivelmente devido o contato do disco ao mordente de aço ter sido maior que 15 graus, que é o limite previsto, ou seja, a equação que a norma sugere já não se aplicaria mais.

A análise com o uso do programa GOM Correlate demonstrou que em alguns ensaios não foi possível visualizar com clareza as fissuras durante os estágios iniciais, pois não se obteve uma boa precisão no padrão de pigmentação empregado nas faces dos discos. Porém, nas fotos das condições de aplicação de carga por meio de tiras de papelão e sobre os chanfros observou-se que as fissuras tiveram início no centro do disco, o que está de acordo com a literatura.

Foi possível analisar a diferença entre as seis condições de aplicação de carga ao comparar o carregamento aplicado sob uma área infinitesimal (concentrada) e um carregamento distribuído. Ao atingir o primeiro pico e dar início ao processo de falha do material, a aplicação de carga por meio de barras de aço, que apresenta uma carga concentrada, resultou em uma menor porcentagem de deformação, 0,08%, em comparação com as demais condições de contorno, que tiveram uma média de 0,1%. Enquanto que na condição de aplicação de carga sobre chanfros, que é a que apresenta uma maior superfície de contato e uma melhor distribuição do carregamento, a deformação no primeiro pico e início a fissura foi de 0,17%.

Com os resultados experimentais e as correlações digitais de imagens, os corpos de prova que tiveram um comportamento mais próximo à literatura foram o com aplicação de carga por meio de tiras de papelão e sobre os chanfros, pois as fissuras originaram na região central do disco. No entanto, a moldagem dos chanfros foi de difícil execução. Portanto, a configuração de ensaio mais indicado para realizar o ensaio brasileiro, por meio dos resultados obtidos no presente trabalho, é a aplicação de carga por meio de tiras de papelão.

Na modelagem numérica, foram empregados elementos finitos de interface associados a uma lei de dano para introduzir as fraturas no modelo. Os elementos de interface foram colocados entre todos os elementos sólidos, à exceção de uma região próxima à condição de contorno no disco. Desse modo evitou-se que as fraturas se desenvolvessem precocemente na região de imposição da condição de contorno. Os resultados se mostraram sensíveis ao tamanho dessa região.

A evolução do dano e o surgimento da fissura na condição de aplicação de carga por meio de mordentes de aço aconteceram de forma mais homogênea e uniforme em comparação com a aplicação direta de carga com e sem chapas metálicas, como pode ser visto nos gráficos de dano. Na condição de aplicação direta de carga ela se faz de forma concentrada, e com o uso dos mordentes de aço, ela está distribuída em uma área de transferência maior. Por essa razão, o dano se comporta de forma diferente no interior do disco.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Ao fim de todas as análises realizadas no presente trabalho, conclui-se que é uma pesquisa muito complexa, que ainda deve ser mais investigada. Dessa maneira, são sugeridas algumas melhorias nos ensaios e outras análises, como:

- Realizar uma pigmentação mais refinada das faces dos corpos de prova para aprimorar a correlação digital de imagens.
- Ter um melhor controle dos procedimentos experimentais do ensaio brasileiro, a fim de reduzir os erros nos resultados dos ensaios.
- Realizar simulações numéricas das aplicações de carga por meio de ripas de madeira, por tiras de papelão, através de barras de aço e sobre chanfros, pois assim terá uma comparação mais ampla entre os resultados experimentais e numéricos.
- Realizar uma modelagem numérica com modelo elasto-plástico para se aproximar mais da realidade do ensaio experimental.

Akazawa T. 1943. "New test method for evaluating internal stress dueto compression of concrete: the splitting tension test" *J Japan Soc Civil Eng* 29:777–787.

Anderson, T. L., *Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications*, 3rd Ed, 2004.

Anon. 2017. "ESTUDO DO ENSAIO BRASILEIRO APLICADO AO CONCRETO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS." *Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão* 5.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2011. "Concreto e Argamassa — Determinação Da Resistência à Tração Por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos." *Abnt Nbr 7222*.

ASTM C 469-02. 2010. "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson' s Ratio of Concrete in Compression." *ASTM International*.

ASTM C39. 2012. "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens." *ASTM Standards*.

ASTM Standard D3967-08. 2008. "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens." *ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/D3967-08.2* 20–23.

Carmona, Sergio and Antonio Aguado. 2012. "New Model for the Indirect Determination of the Tensile Stress-Strain Curve of Concrete by Means of the Brazilian Test." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 45(10):1473–85.

Carneiro, Fernando Luiz Lobo. 1943. "Ensaio de Compressão Diametral Ou Ensaio de Tração Indireta." 1–12.

Day, R. A. and D. M. Potts. 1994. "Zero Thickness Interface Elements— Numerical Stability and Application." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*.

Denneman, E., E. P. Kearsley, and A. T. Visser. 2011. "Splitting Tensile

Test for Fibre Reinforced Concrete.” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 44(8):1441–49.

Erarslan, Nazife and David John Williams. 2012. “Experimental, Numerical and Analytical Studies on Tensile Strength of Rocks.” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 49:21–30.

Es-Saheb, Mahir H., Abdulmohsen Albedah, and Faycal Benyahia. 2011. “Diametral Compression Test: Validation Using Finite Element Analysis.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 57(5–8):501–9.

Fairbairn, E. M. R. 2002. “A Tribute to Fernando L. L. B. Carneiro (1913 - 2001) Engineer and Scientist Who Invented the Brazilian Test.” *Materials and Structures*.

Fairhurst, C. 1964. “On the Validity of the ‘Brazilian’ Test for Brittle Materials.” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And* 1(4):535–46.

García, Víctor J., Carmen O. Márquez, Alonso R. Zúñiga-Suárez, Berenice C. Zúñiga-Torres, and Luis J. Villalta-Granda. 2017. “Brazilian Test of Concrete Specimens Subjected to Different Loading Geometries: Review and New Insights.” *International Journal of Concrete Structures and Materials*.

Gong, Fengqiang, L. I. Xibing, and J. Zhao. 2010. “Analytical Algorithm to Estimate Tensile Modulus in Brazilian Disk Splitting Tests.” *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering*.

Goodman, R. E., R. L. Taylor, and T. L. Brekke. 1968. “A Model for the Mechanics of Jointed Rock.” *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.* Gutierrez-Moizant, R., M. Ramírez-Berasategui, S. Santos-Cuadros, and C. García-Fernández. 2018. “Computational Verification of the Optimum Boundary Condition of the Brazilian Tensile Test.” *Rock Mechanics and Rock Engineering* 51(11):3505–19.

Hillerborg, A., M. Modéer, and P. E. Petersson. 1976. “Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements.” *Cement and Concrete Research*.

Hondros, G. 1959a. “The Evaluation of Poisson’s Ratio and the Modulus of Materials of a Low Tensile Resistance by the Brazilian (Indirect Tensile) Test with Particular Reference to Concrete.” *Australian Journal of Applied*

Science.

Hondros, G. 1959b. "The Evaluation of Poisson's Ratio and Young's Modulus of Materials of a Low Tensile Resistance by the Brazilian Test." *Australian Journal of Applied Science* 10(3):243–68.

Hudson, J. A., E. T. Brown, and F. Rummel. 1972. "The Controlled Failure of Rock Discs and Rings Loaded in Diametral Compression." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*.

Hung, K. M. and C. C. Ma. 2003. "Theoretical Analysis and Digital Photoelastic Measurement of Circular Disks Subjected to Partially Distributed Compressions." *Experimental Mechanics*.

ISRM. 1978. "Suggested Methods For Determining Tensile Strength of Rock Materials." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*.

Jaeger, J. C. and E. R. Hoskins. 2012. "Rock Failure under the Confined Brazilian Test." *Journal of Geophysical Research*.

Komurlu, Eren and Ayhan Kesimal. 2015. "Evaluation of Indirect Tensile Strength of Rocks Using Different Types of Jaws." *Rock Mechanics and Rock Engineering*.

Lapwood, E. R., N. I. Muskhelishvili, and J. R. M. Radok. 2007. "Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity." *The Mathematical Gazette*.

Li, Diyan and Louis Ngai Yuen Wong. 2013. "The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 46(2):269–87.

Lin, Hang, Wei Xiong, Wenwen Zhong, and Caichu Xia. 2014. "Location of the Crack Initiation Points in the Brazilian Disc Test." *Geotechnical and Geological Engineering* 32(5):1339–45.

Markides, Ch F. and S. K. Kourkoulis. 2012. "The Stress Field in a Standardized Brazilian Disc: The Influence of the Loading Type Acting on the Actual Contact Length." *Rock Mechanics and Rock Engineering*.

Markides, Ch F., D. N. Pazis, and S. K. Kourkoulis. 2010. "Closed Full-Field Solutions for Stresses and Displacements in the Brazilian Disk under Distributed Radial Load." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 47(2):227–37.

Mellor, Malcolm and Ivor Hawkes. 1971. "Measurement of Tensile Strength

- by Diametral Compression of Discs and Annuli.” *Engineering Geology*.
- Pallett, Peter F., Nick J. Gorst, Les A. Clark, and Williamson S. J. 2003. *Friction in Temporary Works*.
- SATOH, Yoshiteru. 2011. “Position and Load of Failure in Brazilian Test; A Numerical Analysis by Griffith Criterion.” *Journal of the Society of Materials Science, Japan*.
- Sutton, MA, WJ Wolters, WH Peters, WF Ranson, and SR McNeill. 1983. “Determination of Displacements Using an Improved Digital Correlation Method.” *Image and Vision Computing*.
- Instituto Nacional de Tecnologia. 2005. “Instituto Nacional de Tecnologia desde 1921 gerando Tecnologia para o Brasil 1921 - 2001.” INT.
- Wang, Q. Z., H. Fan, X. P. Gou, and S. Zhang. 2013. “Recalibration and Clarification of the Formula Applied to the ISRM-Suggested CCNBD Specimens for Testing Rock Fracture Toughness.” *Rock Mechanics and Rock Engineering* 46(2):303–13.
- Wang, Q. Z., X. M. Jia, S. Q. Kou, Z. X. Zhang, and P. A. Lindqvist. 2004. “The Flattened Brazilian Disc Specimen Used for Testing Elastic Modulus, Tensile Strength and Fracture Toughness of Brittle Rocks: Analytical and Numerical Results.” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.
- Yu, Y. 2005. *Questioning the Validity of the Brazilian Test for Determining Tensile Strength of Rocks*. Vol. 24.
- Yu, Y. and Y. Xu. 2006. “Method to Determine Tensile Strength of Rock Using Flattened Brazilian Disk.” *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering*.

ANEXO A

A Tabela 0.1 mostra os resultados obtidos nos ensaios de compressão realizados na máquina de ensaio Controls, para fins de controle de qualidade da moldagem realizada em diferentes dias.

Tabela 0.1 - Resultados dos ensaios de compressão realizados na máquina Controls.

Resistência à compressão (MPa)						
	13.07	27.07	03.08	17.08	31.08	06.09
Média	31,49	30,47	36,55	29,53	30,81	31,25
DP	1,99	2,92	3,50	1,81	1,94	0,95
Coef. Var.	6,32	9,60	9,59	6,14	6,30	3,05

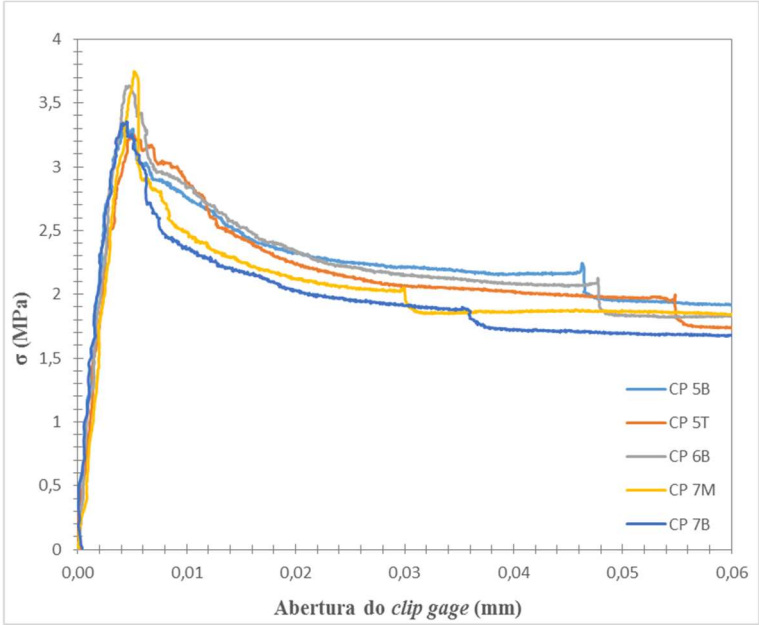
A Tabela 0.2 mostra os resultados obtidos pelos ensaios de compressão realizados ao longo do terceiro dia de cura.

Tabela 0.2 - Resultados dos ensaios de compressão realizados em diferentes horários do terceiro dia de cura.

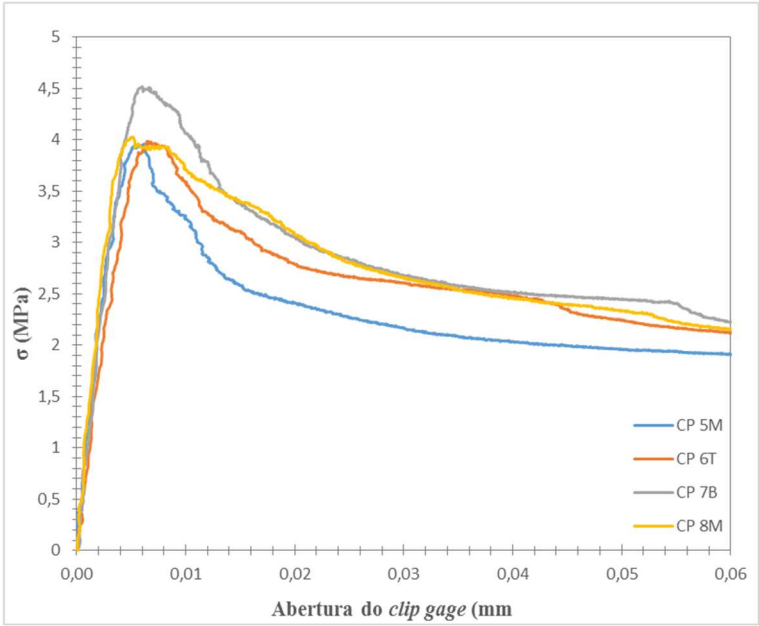
Horário	σ (MPa)
08:00	29,18
	30,16
	27,37
12:00	29,14
	28,38
	33,36
18:00	31,23
	29,01
	29,88
Média	29,74
DP	1,63
Coef. Var.	5,51

ANEXO B

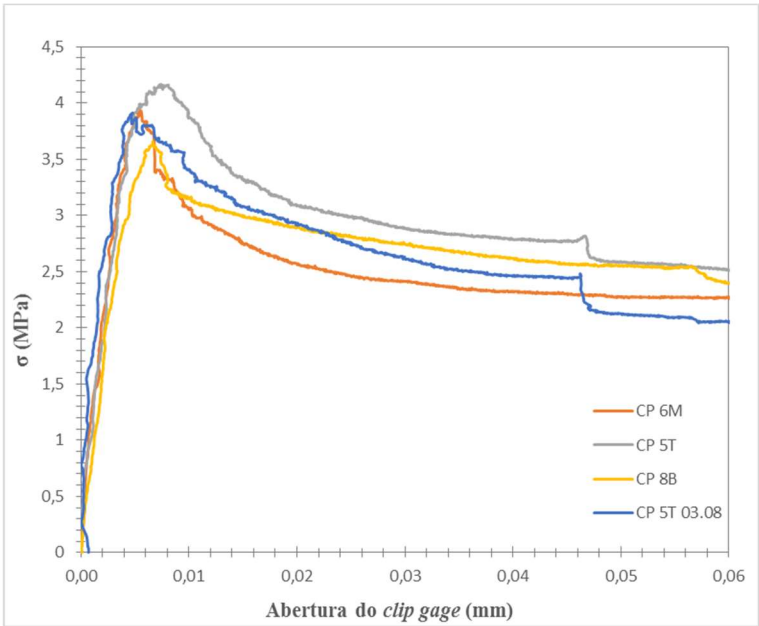
(a)



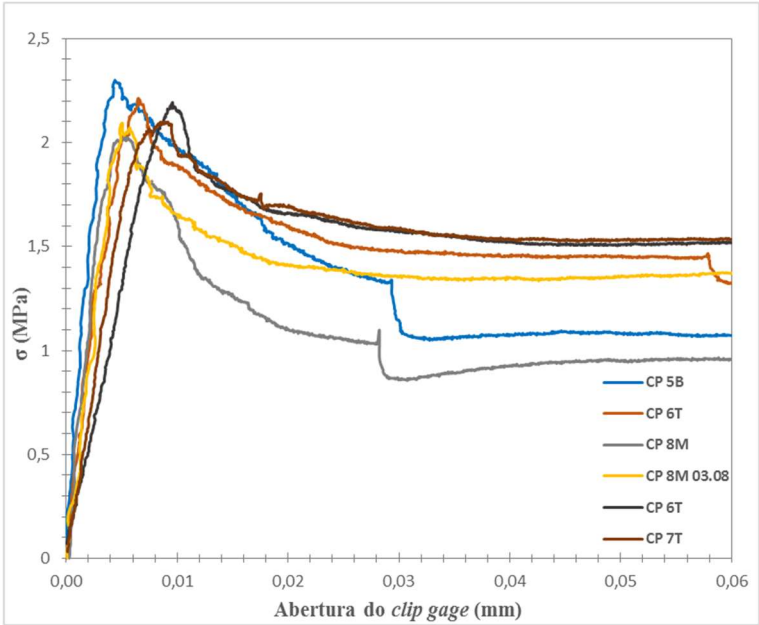
(b)



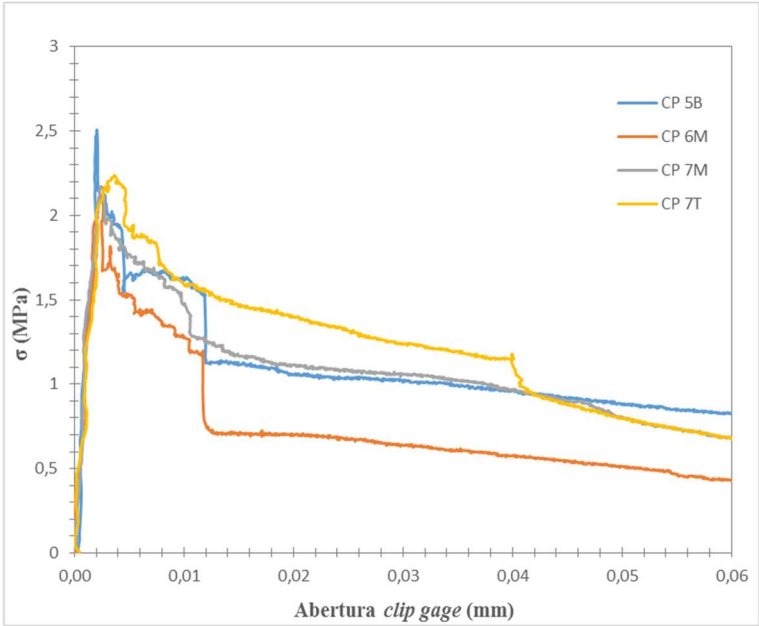
(c)



(d)



(e)



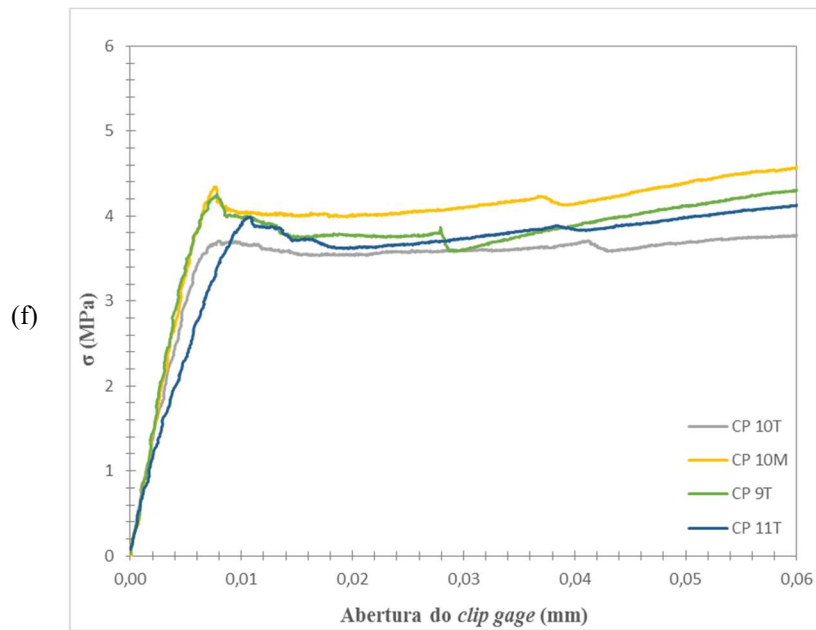


Figura 0.1 - Curvas experimentais de tensão x abertura do *clip gage* de todos os ensaios realizados das seis formas de aplicação de carga (a) aplicação direta (b) por meio de ripas de madeira (c) por meio de tiras de papelão (d) com uso de mordentes de aço (e) por meio de barras de aço (f) sobre chanfros.

ANEXO C



(a)



(b)



(c)

Figura 0.1 - Fissuras obtidas pelo ensaio brasileiro (a) por meio de aplicação direta de carga (b) com aplicação de carga por meio de ripas de madeira (c) com aplicação de carga por meio de tiras de papelão.