

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**MATTHEWS VARGAS VAUCHER BANDEIRA**

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO E GEOMETRIA DOS  
ESPÉCIMES EM RESPOSTA À COMPRESSÃO AXIAL**

**Alegrete  
2020**

**MATTHEWS VARGAS VAUCHER BANDEIRA**

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO E GEOMETRIA DOS  
ESPÉCIMES EM RESPOSTA À COMPRESSÃO AXIAL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Luís Eduardo Kostaski

Coorientador: Prof. Dr. Ederli Marangon

**Alegrete  
2020**

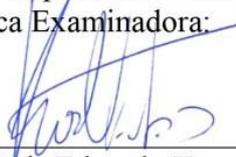
**MATTHEWS VARGAS VAUCHER BANDEIRA**

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO E GEOMETRIA DOS  
ESPÉCIMES EM RESPOSTA À COMPRESSÃO AXIAL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia dos Materiais.

Dissertação defendida e aprovada em dezembro de 2020

Banca Examinadora:



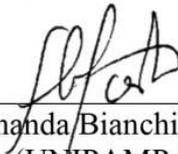
---

Prof. Dr. Luis Eduardo Kostaschi  
Orientador  
(UNIPAMPA)



---

Prof. Dr. Ederli Marangon  
Coorientador  
(UNIPAMPA)



---

Prof.ª Dr. Fernanda Bianchi Pereira da Costa  
(UNIPAMPA)



---

Prof. Dr. Gihad Mohamad  
(UFSM)



---

Prof.ª Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
(UFRGS)

## AGRADECIMENTOS

À Deus pela saúde, proteção e por me abençoar a todo instante, inúmeros momentos pelos quais passei, que sem dúvida algo maior estava comigo e serei eternamente grato por isso.

Desejo que meu falecido pai José Cleber, tenha orgulho de mim, da minha trajetória, dos caminhos que estou trilhando, das decisões que estou tomando e das minhas escolhas.

À minha amada mãe Sandra Vargas e meu padastro Cristiano Brener que sempre me deram todo apoio que esteve ao alcance deles, seja como ouvintes, incentivo nos melhores e piores momentos, conselhos e até mesmo auxílio prático de imenso valor para o trabalho.

À minha namorada Karine Bianchin que sempre me apoiou e se interessou em cada etapa do trabalho, inclusive auxiliando em vários processos do mesmo, estando sempre ao meu lado.

Aos professores Dr. Luis Eduardo Kostas e Ederli Marangon pela orientação e paciência. Obrigado por todas as oportunidades, aprendizados e por serem grandes amigos.

Aos meus colegas e amigos Camila Vargas, Kevin Rebolledo, Nadine Ficher, Pedro Jucá, Danieli Duó, Gustavo Laionel e Raquel Zydeck pela parceria, ajuda em laboratório, aprendizados e colaboradores de uma época inesquecível para toda minha vida. Nunca estive rodeado de pessoas tão boas e maravilhosas ao meu lado, que nesse documento se eternize meu agradecimento por tudo que fizeram por mim e tudo que passamos.

Ao engenheiro e amigo Francisco Keche pela parceria em laboratório durante a graduação, pelo auxílio e conhecimentos que sem dúvida foram primordiais para o término do mestrado.

Aos professores Alisson Milani e Jaelson Budny pelo auxílio em laboratório e conhecimentos técnicos essenciais para desenvolvimento da pesquisa.

Ao engenheiro Dieison Fantineli que auxiliou de maneira determinante para execução do trabalho, assim como o engenheiro Marcelo Dias e Engenheiro Ivan Mangini.

À Escala Engenharia, os quais acompanharam minha trajetória desde a graduação, me proporcionando inúmeras oportunidades, dando muito incentivo e fornecendo conhecimentos práticos e teóricos de engenharia que serviram de maneira crucial para execução da pesquisa de mestrado. Principalmente ao engenheiro Marcos Lopes pelas sugestões de ensaios e incentivo a investigação experimental realizada.

À Unipampa pelos equipamentos e máquinas necessárias para o desenvolvimento da pesquisa.

À FAPERGS pela concessão da bolsa de mestrado para auxílio financeiro.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota”.

Theodore Roosevelt

## RESUMO

A resistência à compressão axial é uma propriedade mecânica fundamental na escolha do material mais apropriado para uma estrutura, logo é necessário que o ensaio de compressão seja executado corretamente, apresentando resultados precisos, sem interferências do ambiente de teste. No entanto, a intensidade da restrição entre os pratos da máquina de ensaio e as faces de contato do espécime pode influenciar diretamente no comportamento mecânico do material, além de que fatores como forma e esbeltez do espécime podem até mesmo intensificar este efeito. Devido à restrição, forças de cisalhamento nas faces de contato promovem um estado triaxial de tensões, este provoca um aumento na resistência máxima, interfere diretamente no comportamento pós-pico e até mesmo no modo de ruptura do material, conferindo-lhe parâmetros que não representam suas reais propriedades. Para este trabalho desenvolveu-se um programa experimental com 121 espécimes, dividindo-se entre cilindros, de altura ( $h$ )=20cm e base( $b$ )=10cm, prismas com  $h$ =20cm e  $b$ =10x10cm e cubos com lados de 10cm, utilizou-se dois traços de concreto com resistências de 50MPa e 30 MPa. Os testes de compressão foram realizados em cinco condições de contorno, três se tratam de meios antifricção: graxa, teflon e placa escova, um de referência: ensaio tradicional normatizado e por fim uma configuração de máxima fricção: chapas metálicas com espessura de 3 mm coladas nas faces de contato dos corpos de prova. Dentre os resultados, pode-se destacar que quanto menor a relação  $h/b$  (altura/base) do espécime, maior é a resistência à compressão axial e a tenacidade do material. A variação de resistência entre as relações  $h/b=2,0$  e  $h/b=1,0$  encontrada foi de 15% e 35% para os concretos de 50MPa e 30MPa, respectivamente. Quando utilizados os meios antifricção eliminou-se a variação de resistência para as diferentes geometrias adotadas, assim como se reduziu significativamente o amolecimento pós-pico dos ensaios, o qual é resultado da restrição de contato entre espécime e pratos de aço da máquina de ensaio. Quanto ao modo de ruptura observou-se que as condições de referência e de fricção máxima apresentaram fratura bi-cônica em formato de ampulheta. Para as condições antifricção, verificou-se um modo de ruptura colunar. Com base nesses resultados, a variação do comportamento do material devido à restrição pode prejudicar não só em âmbito acadêmico, mas na prática da engenharia, uma vez que testes de compressão axial são habitualmente realizados para verificar se o material utilizado em obra apresenta propriedades compatíveis com as estimadas em projeto.

**Palavras-Chave:** Condições de contorno. Comportamento mecânico. Compressão axial.

## ABSTRACT

Axial compressive strength is a fundamental mechanical property in choosing the most appropriate material for a structure, so it is necessary that the compression test be performed correctly, giving accurate results without interference from the test environment. However, the frictional intensity between the loading platens and specimen contact faces can directly influence the mechanical behavior of the material, and factors such as specimen shape and height can even intensify this effect. Due to the friction, shear forces on the contact faces promote a triaxial state of stresses, this causes an increase in maximum strength, directly interferes in the post-peak behavior and even in the rupture mode of the material, giving it parameters that do not represent its real properties. For this work, an experimental program was developed with 121 specimens, divided into cylinders, height ( $h$ ) = 20cm and base ( $b$ ) = 10cm, prisms with  $h$  = 20cm and  $b$  = 10x10cm and cubes with 10cm sides, used two concretes with characteristic strength of 50MPa and 30 MPa. The compression tests were carried out in five boundary conditions, three are anti-friction methods: grease, teflon and brush plates, one is a reference: standardized traditional test and finally a maximum friction configuration: 3 mm thick metal sheets bonded on the contact faces of the specimens. Among the results, it can be highlighted that the lower the height/base ratio of the specimen, the greater the strength to axial compression and the toughness of the material. The strength variation between the  $h/b = 2.0$  and  $h/b = 1.0$  ratios found was 15% and 35% for 50MPa and 30MPa concretes, respectively. When using the anti-friction methods, the strength variation for the different adopted geometries was eliminated, as well as the post-peak softening of the tests was significantly reduced, which is the result of contact friction between the specimen and the steel plates of the test machine. As for the rupture mode, it was observed that the reference and maximum friction conditions presented a biconical hourglass fracture. For the anti-friction conditions, there was a columnar rupture. Based on these results, the variation in the material's behavior due to friction can harm not only in the academic field, but in engineering practice, since axial compression tests are usually performed to verify whether the material used on site has properties compatible with the estimated in the project.

**Keywords:** Boundary conditions. Mechanical behavior. Axial compression.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama Tensão x Deformação do concreto em compressão uniaxial.....	19
Figura 2 – Propagação de fissuras em compressão com início na zona de interface: Modo I e Modo II .....	20
Figura 3 - Ruptura dos corpos de prova à compressão: Ruptura (a) cônica, (b) cônica e bipartida, (c) cônica e cisalhada, (d) cisalhada e (e) colunar.....	21
Figura 4 - Zonas de confinamento devido à restrição de contato em espécimes de diferentes relações h/b submetidos à compressão axial .....	23
Figura 5 - Curvas Tensão x Deformação correspondentes aos cubos (a) e cilindros (b) .....	24
Figura 6 – Comportamento de espécimes cilíndricos de concreto com diferentes relações h/d.....	25
Figura 7. Representação esquemática do efeito da restrição final dos corpos de prova submetidos à compressão axial.....	27
Figura 8 - Modo de ruptura de espécimes conforme a condição de contorno: (a) Ensaio com restrição elevado; (b) Ensaio com baixa restrição .....	27
Figura 9 – Processo de ruptura dos espécimes cúbicos nos ensaios experimentais de compressão axial e modo de ruptura final encontrado nas simulações numéricas(barras azuis representam a propagação de fissuras no espécime): (a) Ensaios com Fricção e (b) ensaios Sem Fricção. ....	28
Figura 10 – Modelo de placa escova utilizada para acompanhar a deformação lateral do espécime submetido à compressão axial .....	30
Figura 11 – Ensaios de compressão realizados por Schickter (1973) antes e após a aplicação do carregamento, diretamente pelos pratos de aço da máquina (a), com chapas de alumínio intercaladas por graxa nas faces de apoio (b) e através de placas escova (c).....	31
Figura 12 - Curvas tensão x deformação de espécimes cilíndricos de concreto de alta e baixa resistência submetidos à compressão axial em duas condições de contorno: pratos de aço e teflon.....	33
Figura 13 - Simulações numéricas do efeito do atrito em ensaios de compressão axial para espécimes cilíndricos h/b=2 (a) e prismáticos h/b=1 (b).....	34
Figura 14. Relação entre a resistência à compressão uniaxial e o coeficiente de atrito sob diferentes relações h/b .....	35
Figura 15 – Comportamento tensão x deformação encontrados por Kotsovos (1983): Concretos de resistência média de (a) 50 MPa e (b) 29 MPa.....	37

Figura 16 – Curvas tensão x deformação normalizadas para o concreto utilizando diferentes meios antifricção ( $\sigma$ e $\sigma_u$ representam tensão e tensão última de compressão): (a) traço 25MPa com espessuras menores de condições de contorno; (b) traço 25MPa com espessuras maiores de condições de contorno; (c) traço 50MPa com espessuras menores de condições de contorno; (d) traço de 50MPa com espessuras maiores de condições de contorno.....	38
Figura 17. Representação da variação do comportamento tensão x deformação decrescente do concreto devido a diferentes meios antifricção hipotéticos (a) e a tenacidade determinada a $0,4\sigma_u$ nos ensaios de Kumar <i>et al.</i> (2016) (b).....	38
Figura 18 – Resumo de resultados encontrados por autores que buscaram reduzir a restrição de contato em ensaios de compressão axial e estudar diferentes condições de contorno.....	39
Figura 19 – Etapas da metodologia do estudo.....	41
Figura 20 – Agregados utilizados na produção dos concretos: (a) Brita 1 e (b) Areia média	42
Figura 21 - Composição granulométrica dos agregados graúdo e miúdo .....	43
Figura 22 – Cimento Portland utilizado na produção dos traços de concreto .....	44
Figura 23 - Composição granulométrica do cimento CPV-ARI .....	44
Figura 24 – Betoneira utilizada (a) e Slump Test (b) .....	46
Figura 25 – Formas e geometrias de espécimes adotadas para o programa experimental: espécimes cilíndricos (a), prismáticos (b) e cúbicos (c).....	46
Figura 26 - Condições de contorno utilizadas: graxa (a), teflon (b), placa escova (c), referência (d) e chapas coladas (e) .....	48
Figura 27 – Cortadora (a) e lixadeira metalográfica (b).....	49
Figura 28 – Impressora 3D (a) e Espaçador de cerdas (b).....	50
Figura 29 – Cola estrutural (a) e processo de fixação das cerdas no molde (b) .....	50
Figura 30 – Torno mecânico (a) e aparato após retificação (b).....	51
Figura 31 – Placa Escova desenvolvida para o trabalho .....	51
Figura 32 - Equipamento para os ensaios mecânicos e aquisição dos dados .....	53
Figura 33 – Esquema do programa experimental empregado no trabalho .....	54
Figura 34 – Instrumentação para as geometrias de espécimes adotadas para C30 e C50 .....	55
Figura 35 - Ambiente de teste para ensaios de compressão axial com correlação de imagem	57
Figura 36 – Modo de ruptura dos espécimes cilíndricos do concreto C50 para cada condição de contorno: (a) Graxa, (b) Teflon, (c) Placa Escova, (d) Referência e (e) Chapas Coladas .....	100

Figura 37 – Modo de ruptura dos espécimes cilíndricos do concreto C30 para cada condição de contorno: (a) Teflon, (b) Placa Escova, (c) Referência e (d) Chapas Coladas.	103
Figura 38 – Modo de fissuração das faces de contato dos espécimes para o concreto C50 para cada condição de contorno: (a) Graxa, (b) Teflon, (c) Placa Escova e (d) Referência.	106
Figura 39 – Modo de fissuração das faces de contato dos espécimes para o concreto C30 para cada condição de contorno: (a) Teflon, (b) Placa Escova (c) Referência.....	108
Figura 40 – Mapa de fissuração característico para os concretos C50 e C30 de acordo com cada condição de contorno para espécimes cúbicos e prismáticos desenvolvido pelo software GOM Correlate .....	110
Figura 41 – Imagens dos ensaios de compressão com neoprene e curvas tensão x deformação de cilindros (a), prismas (b) e cubos (c) para o concreto C50 .....	113
Figura 42 – Modos de ruptura característicos dos espécimes cilíndricos (a), prismáticos (b) e cúbicos (c) testados com neoprene e suas respectivas faces de contato fissuradas para o concreto C50.....	114
Figura 43 – Deformação do neoprene durante ensaios de compressão para o concreto C50 (a) e neoprene após termino de ensaio de compressão em espécimes cúbicos e prismáticos (b).....	115

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Traços dos concretos C30 e C50 .....	42
Tabela 2 - Propriedades físicas dos agregados utilizados.....	43
Tabela 3 – Número de corpos de prova para cada configuração de ensaio.....	53
Tabela 4 – Fatores de correlação entre espécimes prismáticos de $h/b=2,0$ e $h/b=1,0$ .....	85

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Objetivo Geral .....	15
1.1.2 Objetivos Específicos .....	15
1.2 Justificativa .....	16
<b>2. ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>17</b>
2.1 Breve Histórico do Ensaio de Compressão Axial.....	17
2.2 Comportamento do Concreto à Compressão Axial .....	18
2.3 Norma de Compressão Axial para Espécimes Cilíndricos de Concreto.....	21
2.4 Fatores que Influenciam em Ensaios de Compressão Axial.....	22
2.4.1 Efeito da Forma, Tamanho e Altura dos Espécimes à Compressão Axial .....	23
2.4.2 Efeito da Restrição de Contato em Ensaios de Compressão Axial .....	26
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>41</b>
3.1 Materiais Utilizados.....	42
3.1.1 Agregados .....	42
3.1.2 Aglomerante .....	44
3.1.3 Aditivo .....	45
3.1.4 Água.....	45
3.2 Métodos Experimentais.....	45
3.2.1 Produção dos Corpos de Prova.....	45
3.2.2 Condições de Contorno Utilizadas .....	47
3.2.2.1 Produção da Placa Escova .....	49
3.2.3 Ensaios de Caracterização Mecânica.....	52
3.2.4 Instrumentação para os Ensaios Mecânicos .....	54
3.2.5 Procedimento de Correlação Digital por Imagem.....	56
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>
4.1 Resultados prévios publicados .....	58
4.2 Artigo Completo .....	59
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>91</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE I – Modo de Ruptura e Fissuração das Faces de Contato dos Espécimes .</b>	<b>100</b>
<b>APÊNDICE II – Modo de Fissuração Característico para cada Condição de Contorno</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE III – Ensaios de Compressão Axial com Neoprene.....</b>	<b>113</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em testes de compressão axial, a restrição entre a amostra e os pratos da máquina resulta em condições de contorno que podem influenciar diretamente nos resultados do ensaio. No caso de materiais frágeis, a restrição nas faces de contato dos espécimes é responsável por consideráveis modificações não só na resistência máxima a compressão, como na absorção de energia e no modo de ruptura, apresentando assim parâmetros que não representam as reais propriedades do material (KUMAR *et al.*, 2016, XU *et al.*, 2017, GAO *et al.*, 2018).

Ensaio de compressão axial são reproduzidos pela aplicação de carga em um corpo de prova através de placas rígidas de aço. Porém, devido à fricção entre os materiais, forças cisalhantes de fricção se originam resultando em uma contenção da deformação lateral e em um estado triaxial de tensões próximo as regiões de contato do espécime (SCHICKTER, 1973). A influência no comportamento mecânico dos corpos de prova em razão deste efeito, ainda não é bem definida, todavia é importante que se reduza a fricção nas zonas de contato para que se reproduza um ensaio de compressão axial mais próximo do ideal (KOTSOVOS, 1983).

Em vista desta problemática, diversos trabalhos buscaram a redução da restrição de contato avaliando diferentes meios antifricção em ensaios de compressão. Autores como van Mier (1984), Torrenti e Royis (1989), Sagong, Kim e Park (2013), Foltz, Lee e LaFave (2017) desenvolveram aparatos que permitiram o deslocamento lateral dos espécimes durante a compressão, os quais são comumente chamados de placas escova. Além destes, também se encontram trabalhos que utilizam teflon, como de Erdei (1980), Barbosa (2008), Christiansen, Martins e Bay (2016), Xu *et al.* (2017) e Vidal *et al.* (2020), e comparações entre diferentes meios antifricção, como borracha (neoprene), PVC, graxa, almofadas MGA (filme de poliéster, uma camada de graxa e uma folha de alumínio), teflon e placas escova foram desenvolvidos por Kotsovos (1983) e Kumar *et al.* (2016).

O confinamento em ensaios de compressão axial possui relação direta com a esbeltez do espécime utilizado, em que quanto menor a relação  $h/b$  (altura/base), maior é o confinamento gerado e maior é a resistência à compressão (CARPINTERI, CIOLA, PUGNO, 2001). Van Mier *et al.* (1997) verificou que espécimes com  $h/b=0,25$  podem apresentar 2x a resistência à compressão de espécimes com  $h/b=2,00$  para o mesmo material, determinou também que ao utilizar chapas de teflon como meio antifricção essa variação de resistência

não ocorre. Quando utilizados cubos para realização de ensaios de compressão, este efeito é bastante significativo, no caso de Mazars (1984) apud Pituba (2003) e Vidal *et al.* (2020) verificou-se que ao utilizar teflon como condição de contorno a resistência dos espécimes cúbicos quando comparados a ensaios de referência podem reduzir entre 40% a 50%. Assim como para Schickter (1973), o qual encontrou uma redução de 20% para ensaios com utilização de placa escova e 8% para chapas de alumínio intercaladas com lubrificante nas faces de contato dos espécimes cúbicos.

Além de a resistência máxima ser significativamente influenciada pela restrição em ensaios de compressão, o comportamento pós-pico do material é fortemente alterado em termos de ductilidade. Para Kotsovovs (1983), borracha e almofadas de MGA são mais eficazes que a placa escova para eliminação do amolecimento pós-pico. Van Mier *et al.* (1997) constatou que a utilização de chapas de teflon são o meio antifricção mais apropriado para redução do efeito de restrição. No entanto, Kumar *et al.* (2016) concluiu que a utilização de graxa é mais eficiente que teflon, borracha e PVC. A graxa eliminou o efeito de fricção que gera um elevado amolecimento e tenacidade ao concreto após alcançar tensão máxima.

A interferência da restrição de contato também pode ser verificada no modo de ruptura dos espécimes ensaiados, pois devido à fricção, a fratura apresenta um formato tronco-cônico, também conhecido como ampulheta, o qual revela o confinamento de tensões presente nas extremidades dos espécimes. Todavia, tratando-se de ensaios de compressão axial espera-se que durante o ensaio ocorra uma gradual propagação de fissuras verticais paralelas à direção de aplicação do carregamento, conforme Bezerra *et al.* (2016), Xu *et al.* (2017) e Bandeira *et al.* (2020) afirmam em seus trabalhos.

Mediante os fatos mencionados, nota-se o quão influente a restrição de contato pode se tornar em um ensaio de compressão axial. Logo, é necessário que se façam cada vez mais estudos que avaliem o melhor método para realização deste tipo de ensaio, verificando em conjunto fatores como a forma e a altura dos espécimes de teste que podem atenuar ou intensificar o efeito de fricção. (PAN; FEN; HUDON, 2009; LIANG *et al.*, 2016). Determinar o comportamento mecânico dos materiais sem a interferência do ambiente de teste contribui não só para a área acadêmica de tecnologia dos materiais, como também para o desenvolvimento de projetos estruturais de engenharia.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Estudar diferentes formas de reduzir o efeito da restrição de contato em ensaios de compressão axial, utilizando um material compósito quase-frágil, concreto.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Para obter o objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos.

- Desenvolver uma placa escova como condição de contorno para execução de ensaios de compressão axial no concreto;
- Utilizar diferentes meios antifricção como graxa, teflon e placa escova nos ensaios de compressão axial, verificando qual a melhor configuração de ensaio para se minimizar o efeito de fricção;
- Além das condições de contorno que visam minimizar a restrição de contato, desenvolver ensaios que simulem máxima restrição, em que os espécimes são ensaiados com chapas metálicas coladas nas faces de contato;
- Utilizar relações de esbeltez  $h/b=1$  e  $h/b=2$  para cada condição de contorno, avaliando a interdependência entre estes dois fatores.
- Utilizar dois concretos com resistências à compressão diferentes, 50 MPa e 30 MPa, para analisar como variam os resultados sob diferentes condições de contorno, forma e altura com a resistência do material.
- Analisar o comportamento tensão x deformação para cada condição de contorno, verificando a variação da rigidez, resistência máxima e amolecimento pós-pico;
- Analisar a deformação lateral no centro e nas extremidades dos espécimes de modo a verificar o efeito de fricção para as diferentes configurações de ensaio;
- Analisar o modo de ruptura dos corpos de prova para todas as condições de contorno impostas, verificando a influência do confinamento em ensaios de compressão axial.

## 1.2 Justificativa

A resistência à compressão axial do material é uma propriedade mecânica de extrema importância em âmbito acadêmico e prático da engenharia. É necessário que os ensaios sejam realizados da maneira coerente, evitando que as propriedades mecânicas do material, como resistência máxima à compressão, tenacidade e modo de ruptura, não sejam influenciadas pela restrição presente entre o espécime e os pratos da máquina de ensaio. Por isso, ao longo dos anos diversos autores buscaram determinar qual o melhor método antifricção para ensaios de compressão.

Kupfer, Hilsdorf e Rusch (1969) e Torrenti e Royis (1989) afirmam em seus trabalhos que as placas escovas são o método mais eficiente de eliminar a restrição de contato. Entretanto, Kotsovos *et al.* (1983) determinou que borracha e almofadas de MGA são mais eficazes que a placa escova na redução da restrição de contato. Para Lee, Song e Han, (2004) e van Mier *et al.* (1997) o teflon é o material mais interessante para redução da restrição. Por fim, Kumar *et al.* (2016) determinou que a utilização de graxa nas faces de contato dos espécimes é mais eficiente que teflon, neoprene e PVC para redução da restrição interfacial.

Em razão da discordância sobre qual o melhor método de se minimizar a restrição de contato em ensaios de compressão, a variação de métodos de análise e geometria de corpos de prova utilizados entre os autores e a escassez de trabalhos relativos a este tema, faz-se necessário estudos cada vez mais completos que busquem condições de contorno que eliminem o efeito de fricção em ensaios de compressão axial.

## 2. ESTADO DA ARTE

Ao longo deste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica que tem por objetivo inicialmente introduzir a ideia central do trabalho, no caso o ensaio de compressão axial. Posteriormente, o enfoque é dado ao material utilizado na presente pesquisa, tratando principalmente do seu comportamento Tensão x Deformação em ensaios de compressão e seu modo de fissuração. Em seguida, será apresentada uma revisão bibliográfica focada em fatores que influenciam no comportamento mecânico do concreto durante o ensaio, sendo estes: a esbeltez dos espécimes, o fator de tamanho e a restrição presente entre os corpos de prova e os pratos da máquina de ensaio.

### 2.1 Breve Histórico do Ensaio de Compressão Axial

Segundo Bezerra *et al.* (2016) desde o século passado, o ensaio de compressão axial, ou uniaxial devido à aplicação de carga em uma única direção, possibilita diferentes geometrias de corpos de prova para realização dos ensaios. Inicialmente, na Alemanha, a forma cúbica foi comumente utilizado nos primeiros estudos referentes às propriedades de tecnologia do concreto. Para aquela época, cubos de 15 cm de face se enquadraram bem nos padrões de máquina utilizados, contanto que fosse garantido o paralelismo das faces de contato.

Nos Estados Unidos, ao invés da forma cúbica se adotou a cilíndrica, a qual demonstrou mais facilidade de execução. Uma vantagem é não apresentar locais de maior densidade heterogênea, como ocorrem nas arestas dos cubos, assim como também não é necessário garantir o paralelismo de faces. No entanto, um problema ainda é a superfície dos espécimes, sendo necessário capeamento ou retificação para posterior realização do ensaio.

Para os espécimes inicialmente utilizou-se uma relação  $h/b=1,0$ , porém foi verificado através dos modos de falha que a restrição entre o corpo de prova e os pratos da máquina de ensaio estava influenciando consideravelmente nestes. Desse modo, Hubert Rusch, engenheiro alemão, determinou que a relação  $h/b$  deveria ser equivalente a dois, de acordo com seus estudos de esbeltez (BEZERRA *et al.*, 2016).

Diversas geometrias foram testadas ao longo dos anos buscando melhor compatibilidade com o ensaio de compressão axial. Estudos sobre previsão de modo de falha no concreto foram realizados por Pivonka, Lackner e Mang (2003) e Hampel *et al.* (2009).

Entretanto estes não levaram em conta a fricção entre os espécimes e os pratos da máquina de ensaio. Vale ressaltar que estudos como de Gao *et al.* (2018) verificaram que para o caso de espécimes de elevada esbeltez o confinamento pela restrição não apresenta efeito significativo, dado que ao optar por trabalhar com espécimes de geometria cúbica, estes tendem a apresentar resistência 15% mais elevada que os cilíndricos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Posto isso, mesmo que o ensaio de compressão uniaxial seja de simples execução, é de suma importância enfatizar às possíveis interferências nos resultados da análise de um material. Afinal as geometrias mudam de acordo com a necessidade do ensaio, visto que tanto o formato prismático, como o cilíndrico apresentam vantagens em determinados aspectos, como o caso do trabalho de Bandeira *et al.* (2019) e van Mier *et al.* (1985) que buscaram analisar a anisotropia do concreto através de ensaios uniaxiais de compressão em espécimes cúbicos, devido a esse geometria dispor de mais de uma face para aplicação do carregamento, ou até mesmo ensaios biaxiais e triaxiais de compressão como de Lee, Song e Han (2004), que mesmo se tratando de ensaios de compressão não podem ser realizados através de cilindros.

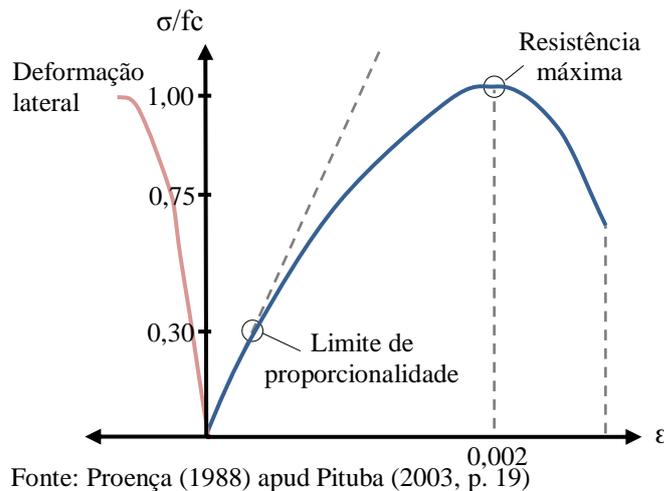
Em virtude disso, espécimes prismáticos e cilíndricos vêm sendo estudadas em diferentes escalas e configurações ao longo dos anos, de modo a determinar uma correlação entre os resultados obtidos por ambos (HUGHES; BHRAMIAN, 1965; KOTSOVOS, 1983; DEL VISO; CARMONA; RUIZ, 2008).

## **2.2 Comportamento do Concreto à Compressão Axial**

O ensaio de compressão axial é utilizado habitualmente para o controle tecnológico em obra, visto que o dimensionamento de uma estrutura de concreto armado é realizado com base em uma resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ), o qual é estimado no desenvolvimento do projeto estrutural pelo engenheiro. Dessa forma, é crucial que a resistência apresentada pelo concreto em obra, seja equivalente ao estabelecido na fase de projeto. No âmbito acadêmico, a resistência à compressão axial sempre foi um dado de grande relevância em trabalhos que utilizem o concreto como material de estudo, sendo praticamente obrigatório em artigos e livros da área constar o  $f_{ck}$  do concreto utilizado. Logo, o ensaio de compressão axial é crucial tanto no campo prático, como no acadêmico quando o objetivo é verificar as propriedades do concreto.

Para se analisar as propriedades mecânicas do concreto, assim como de qualquer outro material, é importante que se entenda o seu respectivo comportamento Tensão x Deformação. Sendo assim, Proença (1988) apud Pituba (2003) descreveu, de maneira sucinta, as fases de um espécime de concreto submetido à compressão uniaxial. Na Figura 1 se pode visualizar o gráfico típico de compressão uniaxial de concreto e como este se deforma lateralmente.

Figura 1 - Diagrama Tensão x Deformação do concreto em compressão uniaxial



Com base na Figura 1, inicialmente ocorre uma fase quase-elástica referente a 30 - 40% da resistência máxima do concreto ( $f_c$ ). Essa porção é caracterizada pela consistência da rigidez e do coeficiente de Poisson do material, não apresentando efeitos recorrentes de microfissuração. Após o limite de proporcionalidade, o mínimo desvio de inclinação é sinal de que já se iniciaram os escorregamentos entre grãos e argamassa.

Entorno de 40 - 50% da  $f_c$ , desenvolve-se uma fase não-linear, contudo estável e que se estende até aproximadamente 70 - 80% da  $f_c$ . Nesse estágio, percebe-se uma redução da rigidez, mas não do coeficiente de Poisson. Ao longo dessa fase ocorre uma danificação interfacial entre o agregado graúdo e a argamassa.

Quando a resistência se encontra em um intervalo de 70 - 80% de  $f_c$  progride até a tensão máxima uma fase caracterizada pelo aumento do coeficiente de Poisson e deformação plástica de modo acentuado. Pode-se dizer que nesse momento do ensaio ocorre uma intensa interação entre fissuras interfaciais, proporcionando fissuras visivelmente maiores.

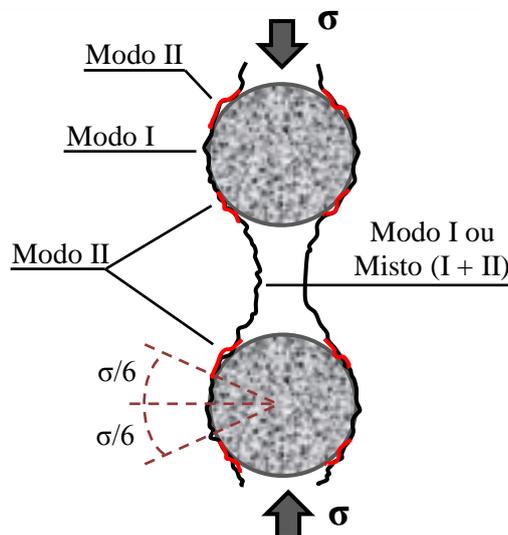
Após a tensão  $f_c$ , inicia-se o ramo decrescente da curva Tensão x Deformação até atingir a tensão e deformação última do material, então ocorre à ruptura do material por esmagamento. Essa fase apresenta fortes alterações e oscilações de acordo com a propagação

das fissuras pela argamassa. Esta porção do gráfico, em que ocorre o amolecimento da curva, é incessantemente estudada ao longo dos anos, visto que os autores têm como premissa provar que esse comportamento não é uma propriedade do concreto, revelando-se exclusivamente pelo confinamento proporcionado pela restrição dos pratos da máquina de ensaio (KOTSOVOS, 1983, VAN MIER *et al.*, 1997, KUMAR *et al.*, 2016).

De acordo com Santiago e Hilsdorf (1973), no ramo decrescente da curva Tensão x Deformação é esperado que as fissuras se desenvolvam paralelas à aplicação do carregamento, entretanto, é comum verificar que estas se desenvolvem inclinadas e com distribuição aleatória próxima as extremidades de contato do espécime em ensaio. Isso ocorre devido ao efeito de restrição nas extremidades da amostra em contato com os pratos da máquina de ensaio. As tensões de cisalhamento que surgem nessa interface influenciam diretamente no comportamento do material.

Pode-se resumir o modo de microfissuração do concreto em dois tipos: Modo I e Modo II. As fissuras iniciais após o início do ensaio se propagam pelo Modo II, ocorrendo na região de contorno do agregado, em uma angulação de aproximadamente  $30^\circ$  ao eixo horizontal. Essa fissura se propaga pela interface do agregado até o Modo I, onde sua evolução é paralela ao eixo de aplicação do carregamento, se propagando assim sucessivamente. Sendo assim, espera-se que em ensaios de compressão uniaxiais as fissuras se propaguem na mesma direção da carga (BUYUKOZTURK; NILSON; SLATE, 1972 apud PITUBA, 2003). Na Figura 2 se verificam os Modos I e II de fissuração.

Figura 2 – Propagação de fissuras em compressão com início na zona de interface: Modo I e Modo II



Fonte: Buyukozturk, Nilson, Slate (1972) apud Pituba (2003, p. 19)

### 2.3 Norma de Compressão Axial para Espécimes Cilíndricos de Concreto

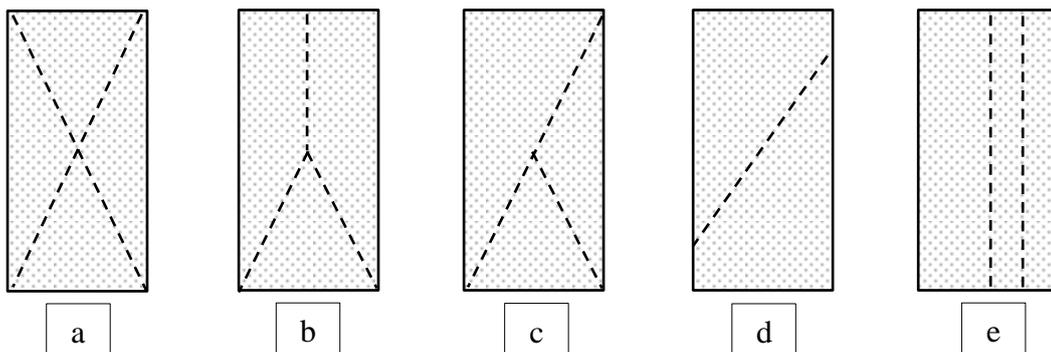
A norma NBR 5739 (ABNT, 2007) define a metodologia que os ensaios de compressão axial de espécimes cilíndricos de concreto devem seguir após moldagem e cura. Sendo esta norma mais difundida para realização de ensaios de compressão axial.

De acordo com a norma, podem-se verificar especificações precisas quanto aos pratos da máquina, como dimensão, desvio máximo de planicidade e dureza por exemplo. Porém, não se apresentam comentários sobre a restrição que deva apresentar a superfície dos pratos da máquina, ou de outros equipamentos que venham a servir como base de aplicação da carga, deixando aberta a possibilidade da utilização de equipamentos complementares, os quais têm como objetivo evitar o capeamento ou possíveis irregularidades superficiais dos espécimes a serem ensaiados.

Em ensaios de compressão axial por cilindros padronizados, é comum a utilização de discos de neoprene para a acomodação do corpo de prova, facilitando a execução do ensaio, caso a retificação ou capeamento não seja necessário. Entretanto, essa alternativa pode gerar uma condição de contorno diferente ao ponto de modificar o comportamento mecânico do material, assim como seu modo de ruptura (XU *et al.*, 2017).

A norma de compressão ainda apresenta alguns modos de ruptura típicos de ensaios de compressão axial, conforme Figura 3. Segundo Tang *et al.* (2000), sabe-se que o modo de ruptura dos corpos de prova evidencia o esforço preponderante na falha do espécime. O autor verificou que ao se utilizar condições de contorno rígidas, com elevada restrição os espécimes romperam em formato de ampulheta, e utilizando condições livres, com baixa restrição os espécimes romperam com rachaduras verticais formando colunas.

Figura 3 - Ruptura dos corpos de prova à compressão: Ruptura (a) cônica, (b) cônica e bipartida, (c) cônica e cisalhada, (d) cisalhada e (e) colunar



Fonte: Adaptado de NBR 5739 (ABNT, 2007)

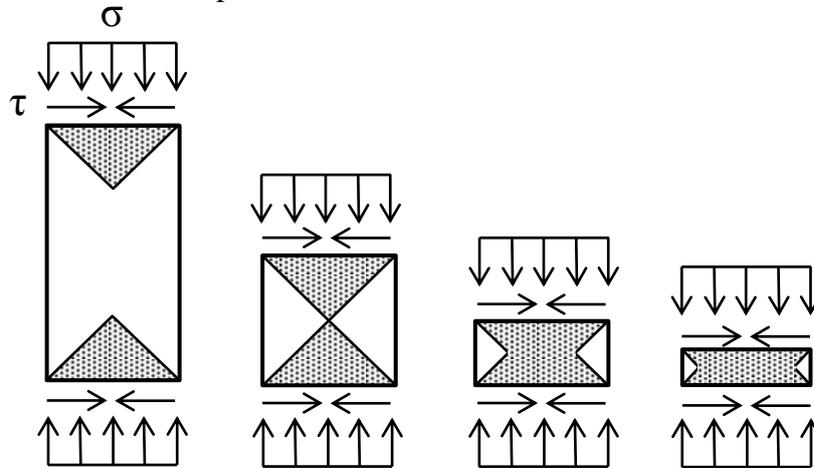
Como pode ser verificado na Figura 3, os modos de fratura encontrados por Tang *et al.* (2000), e não só por este, mas por outros autores como Bezerra *et al.* (2016) coincidem com o que é apresentado na norma NBR 5739 (ABNT, 2007), principalmente quanto a Figura 3 (a) e Figura 3 (e), os quais correspondem aos modos de fratura quando se maximiza e minimiza a restrição, respectivamente. Portanto, mesmo que a norma não comente sobre as possíveis variações de comportamento mecânico e fratura dos espécimes devido à variação de restrição e/ou da esbeltez dos espécimes, os modos de ruptura apresentados pela mesma, confirmam a influência destes fatores nos ensaios de compressão axial.

#### **2.4 Fatores que Influenciam em Ensaios de Compressão Axial**

Sem dúvida, o ensaio mais comum a ser realizado no concreto é o ensaio de resistência à compressão axial, visto que apresenta fácil execução e é relativamente barato de ser realizado, possibilitando a utilização de espécimes com diferentes geometrias. Entretanto, fatores relativos ao próprio espécime e ao ambiente de teste podem influenciar no comportamento característico do material (TORRETI, *et al.* 1993, DEL VISO, CARMONA, RUIZ, 2008). Dentre os principais fatores, podem-se citar como preponderantes esbeltez, o fator de tamanho e a restrição dos pratos da máquina de ensaio, além de que também possuem relação entre si e por isso, além de serem estudadas individualmente, devem ser analisadas em conjunto (VAN MIER, *et al.* 1997).

O efeito do confinamento em ensaios de compressão axial está diretamente relacionado à esbeltez do corpo de prova utilizado, sendo que quanto menor a relação  $h/b$ , maior é o confinamento no espécime, fato que propicia a modificação das propriedades mecânicas do concreto (CARPINTERI, CIOLA, PUGNO, 2001). A correlação entre o confinamento pela restrição e a esbeltez em um ensaio de compressão axial pode ser verificado na Figura 4.

Figura 4 - Zonas de confinamento devido à restrição de contato em espécimes de diferentes relações  $h/b$  submetidos à compressão axial



Fonte: Adaptado de van Vliet e van Mier (1996,p. 10)

#### 2.4.1 Efeito da Forma, Tamanho e Altura dos Espécimes à Compressão Axial

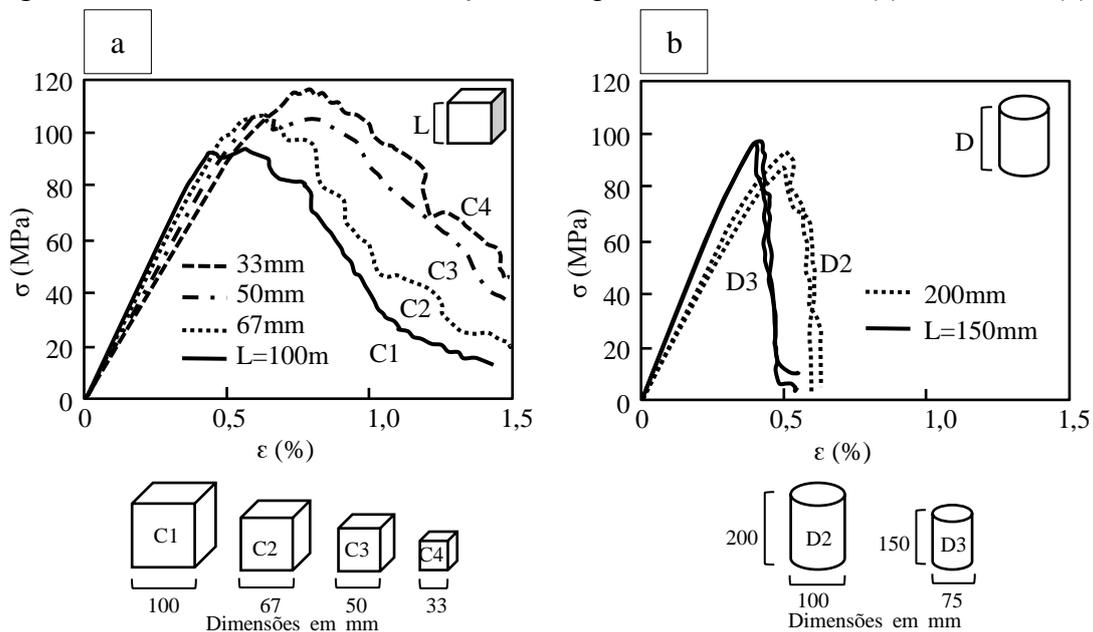
Em ensaios de compressão axial em concreto, a resistência encontrada é significativamente afetada pelo efeito do tamanho e altura dos espécimes devido ao não escalonamento dos agregados (BAZANT, 1984 apud SIM *et al.*, 2013). Sendo bem estabelecido que a resistência do concreto reduz à medida que o tamanho do espécime aumenta, porém há tamanho e esbeltez limites para que esse efeito não ocorra no material (SIM *et al.*, 2013; YI, YANG, CHOI, 2006). Ademais, vale ressaltar a questão geométrica dos corpos de prova, pois a resistência encontrada em prismas é consideravelmente maior que a apresentada por cilindros (HAMAD, 2017).

Uma investigação experimental de compressão axial em espécimes cilíndricos que simulam, devido a sua esbeltez, pilares não reforçados de concreto, foi realizada por Muciaccia, Rosati e Luzio (2017). Estes utilizaram para seus espécimes relações  $h/b$  de 2; 4 e 8, variando os diâmetros de 100 mm a 800 mm e alturas de 200 mm a 3200 mm. Em resumo, verificaram que para relações com  $h/b=8$  a força nominal em média foi de apenas 42% da força encontrada em menores relações de esbeltez. Os resultados dessa investigação demonstraram que o efeito de tamanho e esbeltez de espécimes de concreto submetidos à compressão uniaxial, quando realizada em laboratório em tamanhos reduzidos, como as próprias normas descrevem, os resultados não são um parâmetro do material, pois este está vinculado às características geométricas da amostra. Portanto, se em um projeto estrutural de concreto, uma força constante para tamanhos diferentes é assumida, a segurança de determinada estrutura é reduzida devido ao efeito de tamanho.

Além do fator tamanho, discutido por Muciaccia, Rosati e Luzio (2017), o fator de forma dos espécimes também é bastante estudado. Conforme Del Viso, Carmona e Ruiz (2008), dentre as possíveis geometrias a serem utilizadas em ensaios de compressão axial de materiais frágeis, no caso prismáticas ou cilíndricas, os cilindros com relação  $h/b=2$  são as mais utilizadas. Mesmo que os espécimes cilíndricos sejam os mais usuais, produzidos através da norma NBR 5738 (ABNT, 2016), os cubos também se apresentam bastante competitivos, visto que possuem dois pares de superfícies laterais planas e paralelas entre si, não exigindo o capeamento ou retificação.

Os autores investigaram o comportamento mecânico de espécimes cúbicos e cilíndricos de concreto de alta resistência (aproximadamente 100 MPa) à compressão uniaxial, variando o tamanho das amostras. Seus resultados apontaram que tanto o comportamento pré-pico, como pós-pico dependem da forma e tamanho, sendo que à medida que aumenta o tamanho do espécime, a resistência reduz. Os cubos se apresentaram mais resistentes que espécimes cilíndricos, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 - Curvas Tensão x Deformação correspondentes aos cubos (a) e cilindros (b)

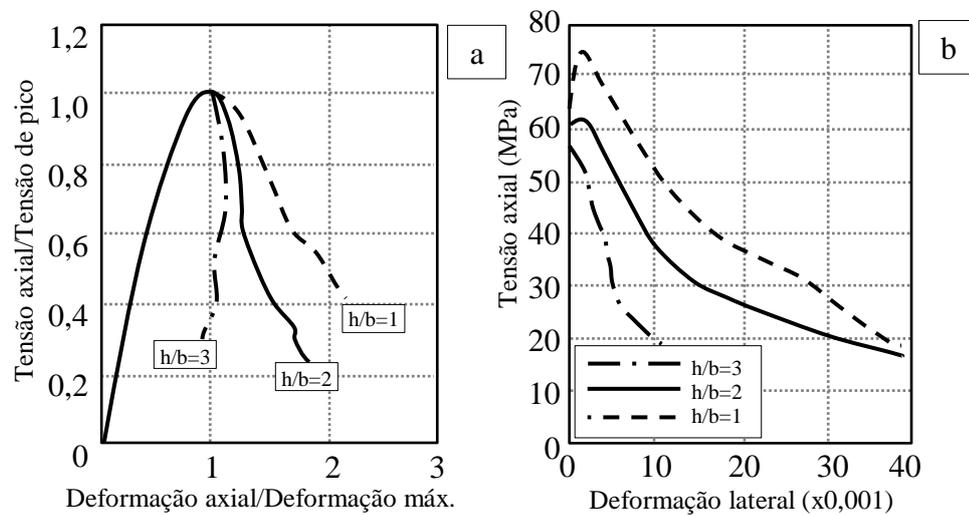


Fonte: Adaptado de Del Viso, Carmona e Ruiz (2008, p. 389)

Tratando-se de materiais frágeis, após o pico de tensão é conveniente que este falhe sem uma deformação plástica considerável, porém não é o que ocorre em espécimes de baixa esbelteza, como verificado na Figura 5 (a).

Ensaio de compressão axial variando a relação  $h/b$  de espécimes cilíndricos de concreto foram realizados por Shah, Choi e Jansen (1996) justamente com o intuito de identificar a mudança no amolecimento. Como mostra a Figura 6, pode-se observar a influência no comportamento pós-pico dos espécimes à medida que se modifica a esbeltez (a), assim como uma mudança na deformação lateral e resistência máxima dos corpos de prova (b). Com base nestes resultados, observa-se como a esbeltez pode modificar a tenacidade do material, assim como a sua capacidade de deformação.

Figura 6 – Comportamento de espécimes cilíndricos de concreto com diferentes relações  $h/d$



Fonte: Adaptado de Shah, Choi e Jansen (1996, p. 1835)

Sim *et al.* (2013) analisou os efeitos na resistência à compressão do concreto variando a relação  $h/b$  dos espécimes com seção circular e quadrada em 1,0 e 2,0. Dos resultados encontrados pelos autores, pode-se analisar o concreto de peso normal utilizado como referência a presente pesquisa. Podem-se destacar algumas conclusões citadas pelos autores, como a decrescente resistência dos espécimes à compressão, ao ponto que se aumenta a dimensão de base ( $b$ ), independente da relação  $h/b$ . Outro interessante resultado que se pode ressaltar é que a partir de um  $b=150$  mm a relação  $h/b$  reduz significativamente sua influência na resistência do concreto, quando se compara  $h/b=2$  /  $h/b=1$  tanto em cilindros como em prismas. Portanto, os autores concluíram que espécimes com  $b=150$  mm pode ser considerado como um limiar do efeito de esbeltez e fator de forma na resistência à compressão de concreto.

Dehestani, Nikbin e Asadollahi (2014), realizaram ensaios de compressão axial em espécimes cilíndricos de concreto utilizando as relações  $h/b$  de 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0. Os autores

verificaram que as resistências reduzem conforme se aumenta a relação  $h/b$ , exceto para a relação  $h/b=2,0$ , a qual apresenta uma resistência maior se comparado a  $h/b=1,5$ . Isso foi constatado em um extenso programa de ensaios com diferentes alturas e misturas de concreto. Essa conclusão demonstra que não é possível afirmar o fato de que quanto maior a esbeltez, menores são as resistências, pois ao ponto que essas variam o fator de forma e a restrição de contato presente também influenciam nas tensões atuantes no espécime.

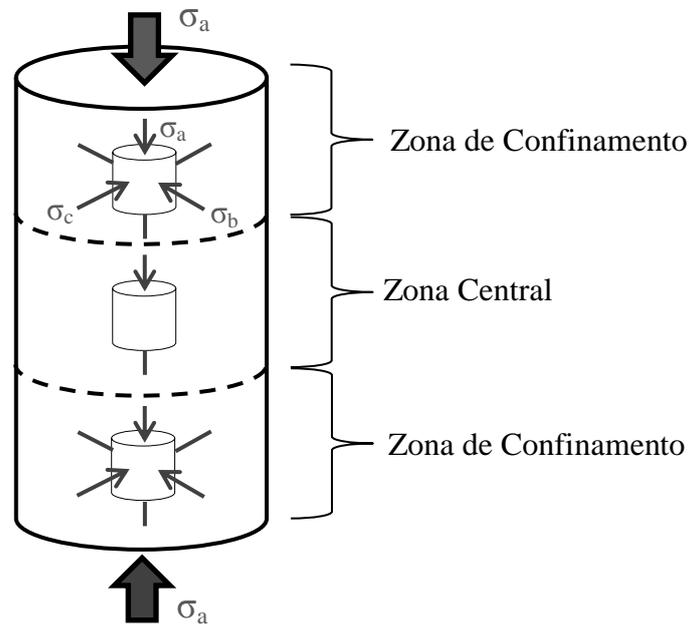
Além de testes estáticos de compressão uniaxial, ensaios dinâmicos foram realizados por Li *et al.* (2018). Neste trabalho os autores verificaram a influência do fator de forma e relação  $h/b$ . No entanto, para ensaios de compressão dinâmica a relação  $h/b$  dos espécimes é insignificante, fato que se justifica o menor efeito do atrito dos testes de impacto. Para testes dinâmicos de compressão variando o fator de tamanho dos espécimes, verificou-se a importância crucial deste fator para estes ensaios devido à modificação na propagação de ondas de tensão.

#### **2.4.2 Efeito da Restrição de Contato em Ensaios de Compressão Axial**

A execução do ensaio de compressão axial em corpos de prova de concreto é realizada pela aplicação de uma carga através dos pratos de aço rígidos da máquina de ensaio. Sabe-se que a resistência obtida com o ensaio não é proveniente 100% de um estado uniaxial, mas sim triaxial, o qual ocorre devido a um confinamento gerado pela restrição de contato entre os pratos da máquina e o espécime. Sendo assim, deve-se sempre que possível reduzir este efeito reduzindo a fricção nas zonas de contato (SCHICKTER, 1973). Esse processo de confinamento final nos espécimes pode ser verificado na Figura 7.

Segundo Van Geel (1998), devido ao efeito do confinamento, ocorre uma mudança na forma de ruptura e alteração no comportamento Tensão x Deformação, verificando uma maior resistência e uma absorção de energia mais elevada no caso de espécimes ensaiados com restrição excessiva, com ruptura característica em formato ampulheta. Além de que, segundo Page e Kleeman (1991), a deformação lateral dos espécimes é comprometida devido à restrição nas extremidades.

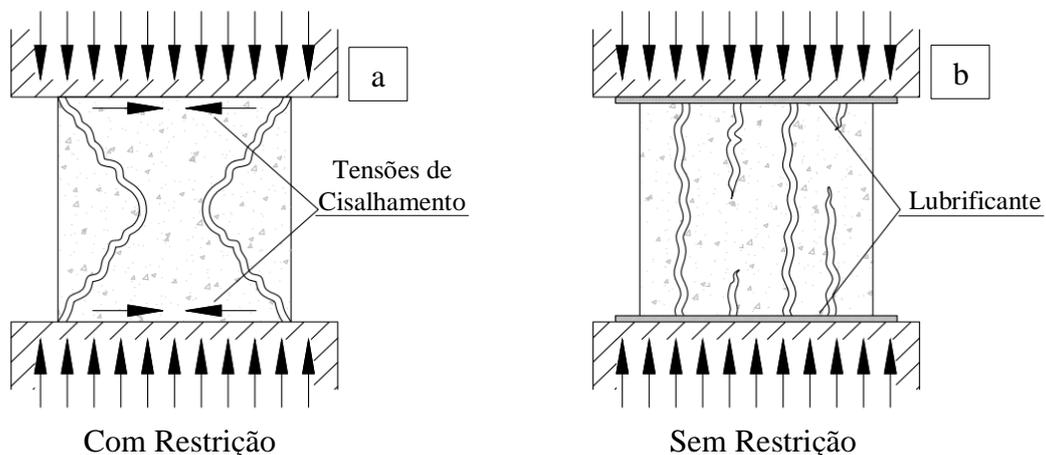
Figura 7. Representação esquemática do efeito da restrição final dos corpos de prova submetidos à compressão axial



Fonte: Adaptado de Kotsovos (1983, p. 4)

Na Figura 8, podem-se verificar os modos de ruptura de espécimes cúbicos submetidos a carregamento uniaxial encontrados por Baykov e Sigalov (1980), sendo que na Figura 8 (a) se utilizou elevada restrição entre o espécime e os pratos da máquina de ensaio, caracterizando uma alta fricção nas extremidades do corpo de prova, enquanto na Figura 8 (b) foi utilizado um lubrificante para redução da restrição e conseqüentemente da fricção. Para ensaios com fricção se verifica um modo de rompimento em formato de ampulheta, já para os sem fricção é verificado uma ruptura colunar formada por fissuras verticais.

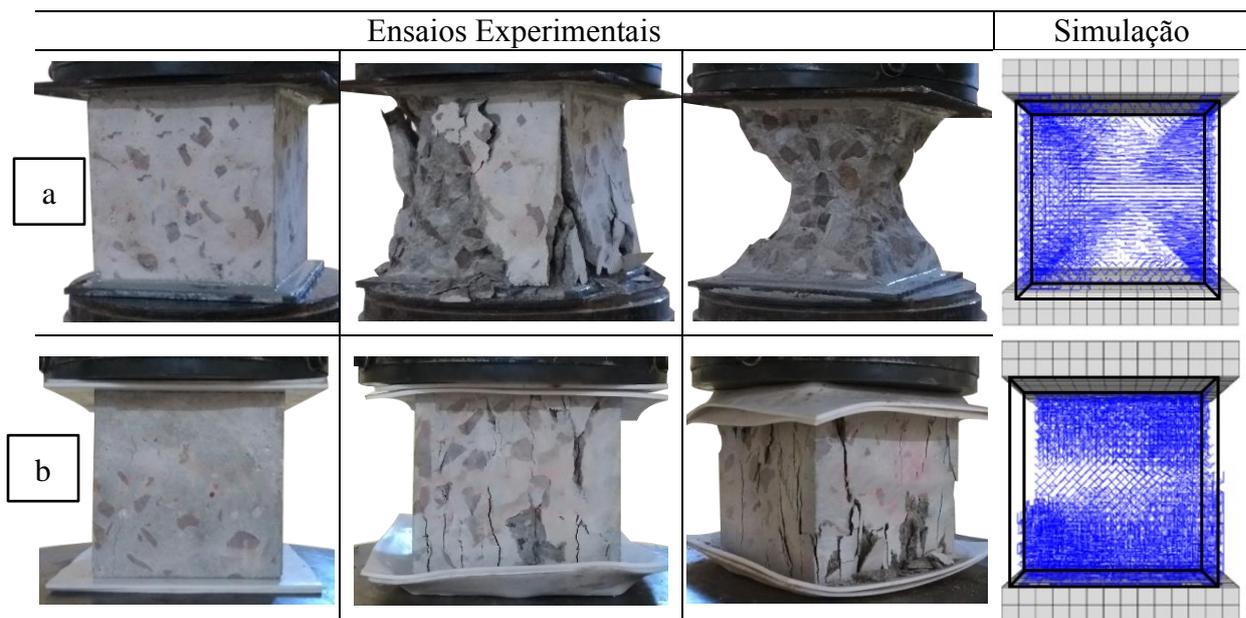
Figura 8 - Modo de ruptura de espécimes conforme a condição de contorno: (a) Ensaio com restrição elevada; (b) Ensaio com baixa restrição



Fonte: Adaptado de Baykov e Sigalov (1980)

Vidal *et al.* (2020) avaliou o efeito de anisotropia do concreto e a as condições de contorno impostas em ensaios de compressão axial. Os autores verificaram que a relação entre a resistência à compressão não confinada (sem fricção) e confinada (com fricção), medida em amostras cúbicas de concreto, é em média 0,35. A utilização do Método de Elementos Discretos Lattice (LDEM) implementado no software Abaqus / Explicit permitiu verificar a interação entre os efeitos que resultam do confinamento do material devido à fricção e a influência da direção de lançamento do concreto ser diferente da direção de aplicação de carga. Os resultados encontrados numericamente foram coerentes com os verificados pelo método experimental, não só em termos de comportamento mecânico como no modo de ruptura dos espécimes (Figura 9). Para a investigação experimental foi utilizado teflon nas faces de contato como condição “sem fricção” e chapas de aço coladas nas faces de apoio dos espécimes para condição de “com fricção”. Numericamente simulou-se uma condição de apoio sem restrição e uma condição de engaste para fricção. O efeito de anisotropia é maximizado quando a condição de limite é sem fricção. Na Figura 9 se pode verificar os processo de ruptura dos espécimes ensaiados para as duas condições de contorno e os modos de ruptura encontrados numericamente.

Figura 9 – Processo de ruptura dos espécimes cúbicos nos ensaios experimentais de compressão axial e modo de ruptura final encontrado nas simulações numéricas (barras azuis representam a propagação de fissuras no espécime): (a) Ensaios com Fricção e (b) ensaios Sem Fricção.



Fonte: Adaptado de Vidal *et al* (2020)

Além de Vidal *et al* (2020), autores como Bandeira *et al* (2020) e Kostascki *et al* (2018) também estudaram o efeito da anisotropia do concreto e ambos afirmaram em seus trabalhos que este efeito é dependente da restrição de interface em ensaios de compressão axial. Bandeira *et al* (2020) utilizou condições de mínimo fricção através de uma camada de graxa nas faces de contato, referência sem a utilização qualquer material nas interfaces e condição de máxima fricção com chapas metálicas coladas nas faces de apoio de espécimes cúbicos. Os autores utilizaram duas resistências de concreto, de 30MPa e 65MPa. Observou-se uma variação de 40% entre os casos com graxa e com chapas metálicas coladas, independente da classe de concreto.

Mazars (1984) *apud* Pituba (2003) relatou o efeito de diversas condições de contorno empregadas pelo autor. Em seu trabalho utilizou corpos de prova cúbicos com dimensões de 20 x 20 x 20 cm, seu objetivo foi determinar a influência das condições de apoio em um ensaio de compressão uniaxial. Conclui-se que realmente ocorreu uma forte relação entre as condições de contato e o comportamento mecânico do material, verificando que quando utilizado nas faces de contato da máquina duas camadas de teflon, a resistência reduz em média 40% em relação à ensaios sem a utilização de meios antifricção.

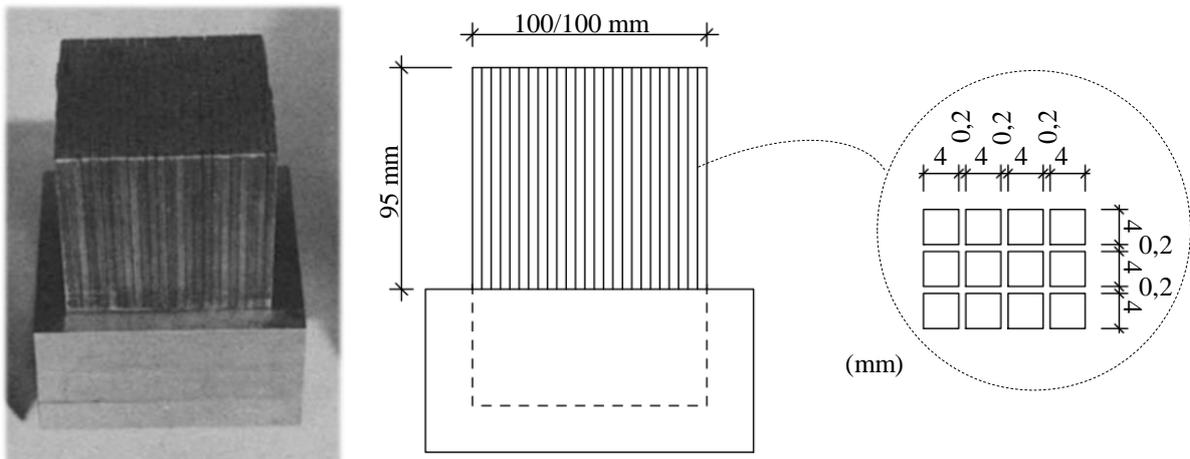
Em decorrência dessa forte influência dos pratos da máquina no comportamento do material sob o ensaio de compressão axial, diversos trabalhos buscaram reduzir a fricção de contato nos espécimes com o objetivo de obter resultados mais precisos quanto à resistência à compressão uniaxial. Hughes e Bahramian (1965) utilizaram almofadas M.G.A. para reduzir a fricção, estas almofadas consistiam em um filme de poliéster, uma camada de graxa e uma folha de alumínio com expansão semelhante à do concreto sob compressão. Kupfer, Hilsdorf e Rusch (1969) utilizou placas escova, as quais consistem em uma série de pequenas barras de aço que deflexionam durante a deformação lateral do concreto sem flambagem, este tipo de dispositivo também foi utilizado por Linse (1973), Schickter (1973), Torrenti e Royis (1989), Page e Kleeman (1991), Torrenti e Djebri (1995). Avaliações entre diferentes meios antifricção foram verificados por Kotsovos (1983), como borracha de neoprene, almofada M.G.A. e placa escova, assim como Kumar *et al.* (2016) que utilizou neoprene, PVC, teflon e graxa e Tschegg *et al.* (1994) com uma abordagem sobre o uso de placas escova e teflon.

Em resumo, Lee, Song e Han (2004) determinaram que teflon é mais eficaz que as placas escova quanto à redução da fricção em ensaios de compressão axial. Kumar *et al.* (2016) concluiu que a utilização de graxa é mais eficiente que teflon, neoprene e PVC, sendo que antigamente muitos autores já haviam afirmado que as placas escovas eram consideradas

as mais eficientes, como Kupfer, Hilsdorf e Rusch (1969) e Torrenti e Royis (1989). Devido a essa discordância sobre qual o melhor modo de se minimizar a restrição de contato e o fato de os trabalhos relacionados a este tema serem bastante escassos, é necessário que se produzam cada vez mais pesquisas que busquem eliminar o efeito de fricção em ensaios de compressão axial.

Como já mencionado, placas escova são eficazes na redução da fricção, porém são relativamente difíceis de fabricar e não são comercializadas. A grande maioria dos estudos em que se utilizam este tipo de aparato é para realização de ensaios de compressão multiaxial, tanto em pesquisas mais antigas como Kupfer, Hilsdorf e Rusch (1969), Linse (1973), van Mier (1984), quanto mais recentes como Sagong, Kim e Park (2013), Foltz, Lee e LaFave (2017). Na Figura 10 está um exemplo de placa escova produzido por Linse (1973).

Figura 10 – Modelo de placa escova utilizada para acompanhar a deformação lateral do espécime submetido à compressão axial

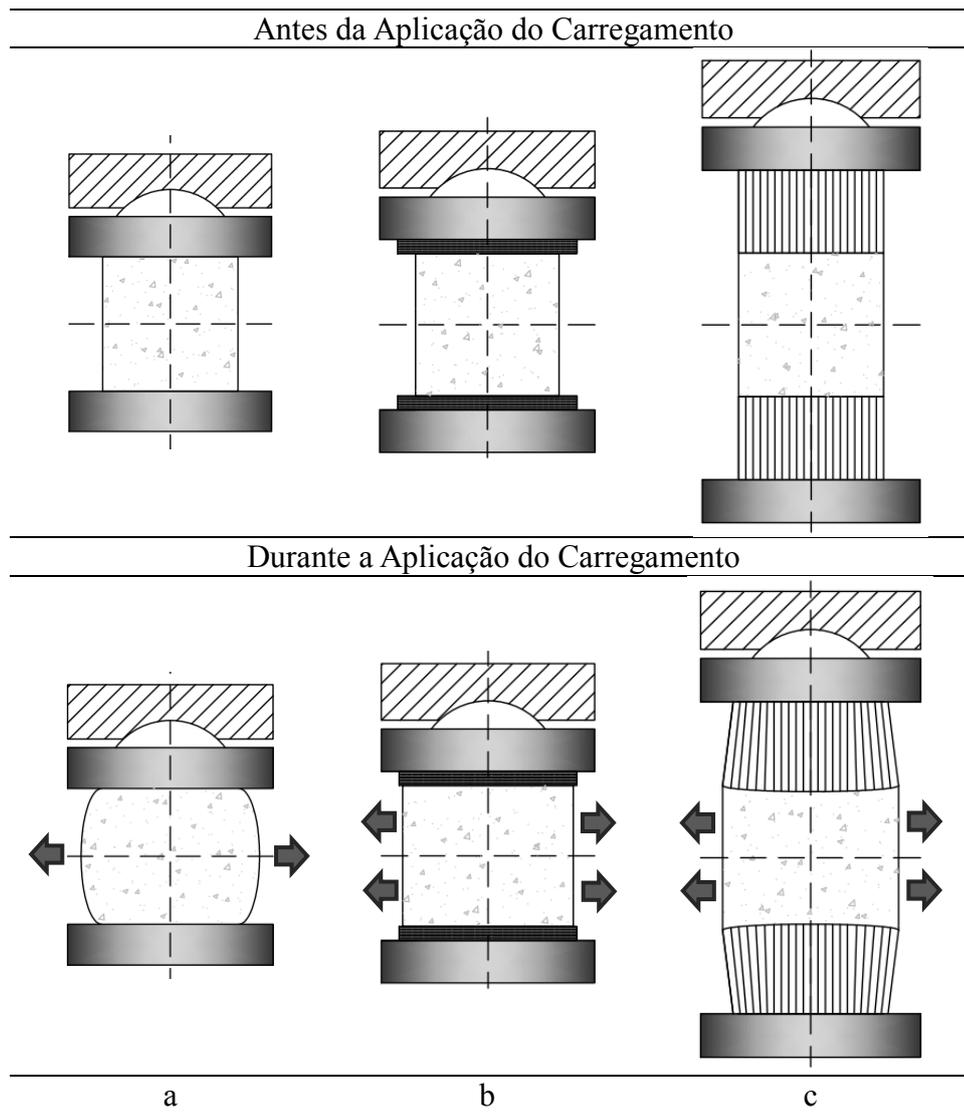


Fonte: Adaptado de Linse (1973, p. 448)

Schickter (1973) executou ensaios de compressão axial em corpos de prova cúbicos de concreto com lados de 10 cm. As configurações de ensaio utilizadas pelo autor podem ser verificadas antes e após a aplicação do carregamento, através da Figura 11. Inicialmente, Schickter realizou ensaios de compressão tradicionais com aplicação da carga direta entre os espécimes e as chapas de aço da máquina de ensaio (a). Sabe-se que neste caso há fricção no espécime e suas extremidades são restringidas pelo atrito interfacial entre os materiais. Como segunda configuração de ensaio, foram utilizadas chapas de alumínio intercaladas com lubrificante (b), o qual proporcionou uma redução de 8% comparado ao ensaio tradicional.

Quanto ao terceiro método de ensaio, foi utilizada uma placa escova (c), a qual reduziu em 19% a resistência do concreto em relação ao ensaio tradicional.

Figura 11 – Ensaio de compressão realizados por Schickter (1973) antes e após a aplicação do carregamento, diretamente pelos pratos de aço da máquina (a), com chapas de alumínio intercaladas por graxa nas faces de apoio (b) e através de placas escova (c)



Fonte: Adaptado de Schickter (1973, p. 489)

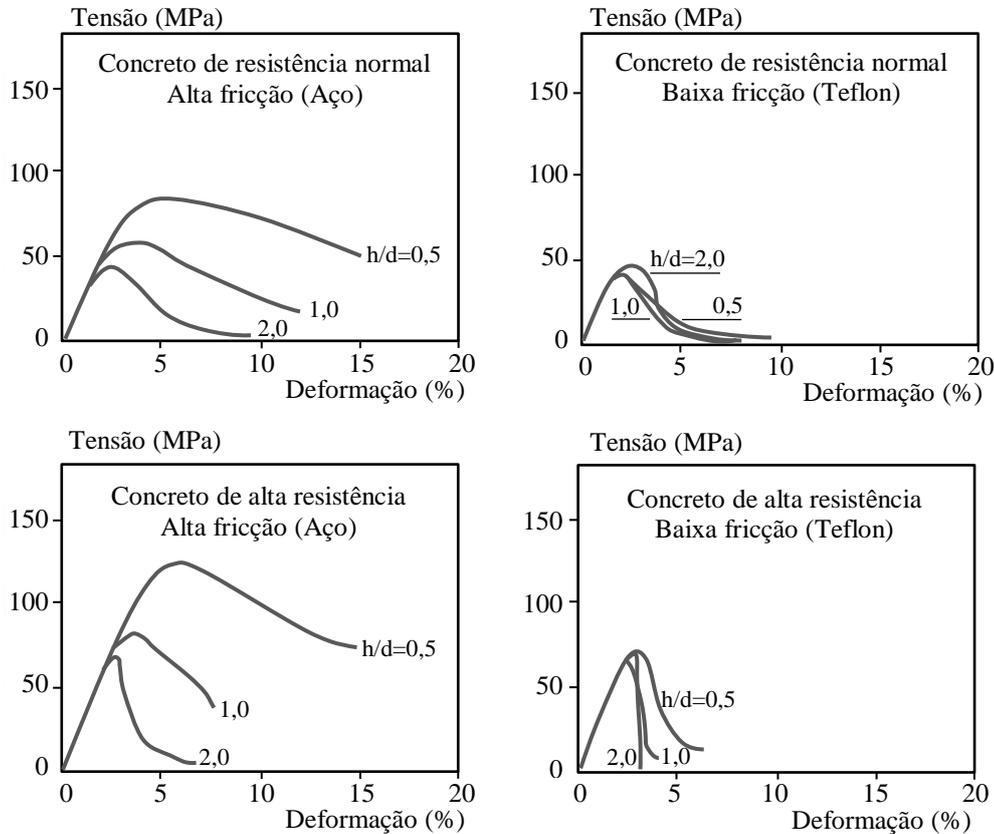
O trabalho de van Mier *et al.* (1997) apresenta um extenso programa de teste sobre amaciamento compressivo realizado pelo Comitê Técnico RILEM 148-SSC intitulado como “Métodos de teste para resposta de tensão de concreto”, o qual buscava desenvolver um método de ensaio padrão confiável para medir o amolecimento de tensões de concreto. Os autores modificaram a esbeltez e as condições de contorno dos espécimes, colocando os

próprios pratos de aço da máquina de ensaio como efeito de máxima fricção e aplicando teflon entre os pratos e o espécime, como baixa fricção.

Na Figura 12 podem-se verificar os gráficos Tensão x Deformação de espécimes cilíndricos de concreto de baixa e alta resistência à compressão axial sob condições de contorno de baixa e alta fricção determinados por van Mier *et al.* (1997). Os gráficos demonstram que para ensaios com alta fricção à medida que se reduz a esbeltez dos espécimes cilíndricos há um aumento gradativo, não só da resistência, como também uma extensa e dúctil deformação é verificada. Quando se utilizou teflon nas extremidades dos cilindros, as resistências dos espécimes não variaram com a mudança de relação  $h/b$ , bem como modificaram drasticamente o seu comportamento pós-pico, demonstrando uma notável redução de ductilidade depois de alcançar a tensão máxima de compressão, não havendo modificação no comportamento pré-pico do concreto.

Segundo van Mier *et al.* (1997), devido a restrição de contato entre os pratos rígidos de aço da máquina de ensaio e o espécime, tensões de cisalhamento interfaciais são geradas pela incompatibilidade destes materiais na expansão lateral. Por consequência, regiões confinadas triaxiais são desenvolvidas no corpo de prova e para espécimes de baixa esbeltez essas zonas confinadas se apresentam em maior relevância como apresentado na Figura 4. Como a resistência à compressão triaxial é normalmente maior que a uniaxial, quanto menor a relação  $h/b$  do corpo de prova, maior é a resistência apresentada pelo espécime devido a esse efeito. Ao utilizar um meio antifricção como o teflon para redução da fricção, o confinamento triaxial no espécime é minimizado, evitando o aumento da resistência do espécime e a redução da tenacidade pós-pico do mesmo, visto que esse amolecimento da curva é fruto da contenção lateral imposto pela restrição dos pratos rígidos da máquina de ensaio.

Figura 12 - Curvas tensão x deformação de espécimes cilíndricos de concreto de alta e baixa resistência submetidos à compressão axial em duas condições de contorno: pratos de aço e teflon



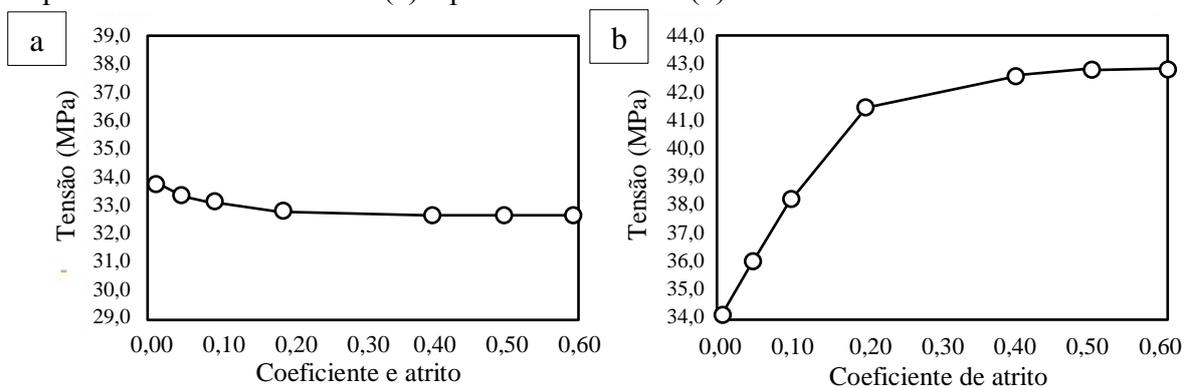
Fonte: Adaptado de Konig *et al.* (1994) apud van Mier *et al.* (1997, p. 203)

Indelicato e Paggi (2008) mencionaram que trabalhos desde a década de 1950 buscam verificar e quantificar a influência da forma e esbeltes dos espécimes na resistência à compressão, focando em determinar fatores que pudessem correlacionar os resultados encontrados por cubos e cilindros. Por isso, os autores buscaram analisar o contato entre os pratos da máquina e a amostra, constatando que as condições de contato desempenham um papel fundamental para explicar a variabilidade de resistência à compressão uniaxial do concreto. No estudo foram propostos ensaios de compressão uniaxial simulados numericamente a partir de modelos de elementos finitos não-lineares. Utilizou-se um estado de tensão plano para cubos de 15 cm de lado e um estado de tensão axial simétrico para espécimes cilíndricos de 30 cm de altura e 15 cm de base. O coeficiente aplicado foi de 0,01, para simular a condição de contorno com teflon e de 0,60 para interfaces de contato entre aço e concreto.

Dentre os principais resultados encontrados se pode destacar que em amostras cilíndricas de relação  $h/b=2$  não houve uma variação significativa da resistência devido ao

coeficiente de atrito, porém para amostras prismáticas de  $h/b=1$ , o inverso foi verificado, quanto maior o atrito maior a resistência apresenta pelo espécime. Os autores ainda concluíram que a esbeltez ideal para ensaios à compressão axial é de  $h/b \geq 2$  para que não sofra influência do atrito, assim como definiram a conversão da resistência de cilindros para cubos pelo fator de 0,78, considerando pratos de aço da máquina de ensaio. Pela Figura 13 é possível visualizar os resultados obtidos pelos autores.

Figura 13 - Simulações numéricas do efeito do atrito em ensaios de compressão axial para espécimes cilíndricos  $h/b=2$  (a) e prismáticos  $h/b=1$  (b)

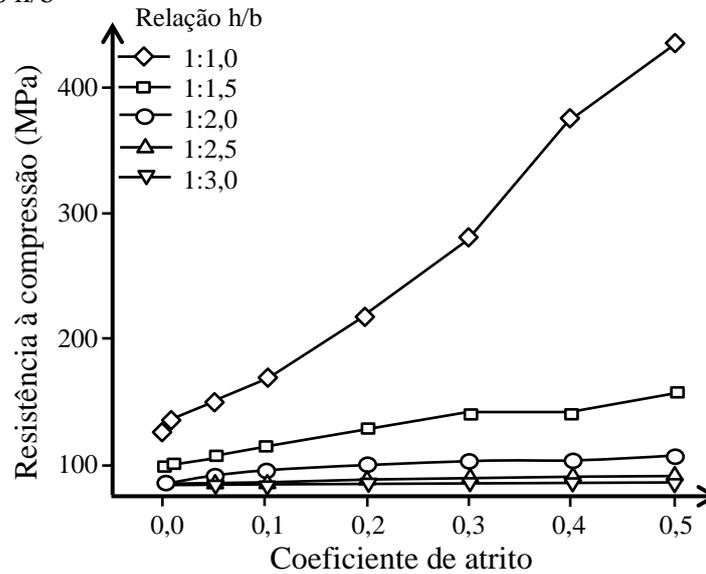


Fonte: Indelicato e Paggi (2008, p.437)

Na área de engenharia de rochas também se preocupa em quão influente são fatores como esbeltez e atrito na resistência de espécimes submetidos à compressão axial. No caso trabalhos como de Tang *et al.* (2000), Thuro *et al.* (2001), Pan, Feng e Hudson (2009) e Xu e Cai (2015). Gao *et al.* (2018) embasaram-se em uma abordagem numérica para analisar o efeito da restrição final de espécimes de rocha à compressão axial, avaliando modos de ruptura e a modificação das propriedades mecânicas. Os autores verificaram que para uma relação de  $h/b=2$  pouco se altera o comportamento mecânico do material devido ao atrito, constatando que o efeito do atrito pode ser amenizado através da esbeltes do espécime, conclusão que condiz com o trabalho de Indelicato e Paggi (2008).

Trabalhos como de Gao *et al.* (2018) ainda certificam que mesmo utilizando configurações de ensaio que reduzem a fricção, em espécimes cilíndricos ao reduzir a relação  $h/b$  de 2 para 1, ainda se tem um aumento da resistência devido ao confinamento interno por tensão triaxial se tratando de materiais frágeis. Os autores apresentam um gráfico (Figura 14) que correlaciona o efeito do atrito com a relação  $h/b$  de espécimes de rocha, afirmando em seu trabalho que a partir de relações  $h/b=2,5$  não há modificação no comportamento mecânico dos espécimes pelo atrito.

Figura 14. Relação entre a resistência à compressão uniaxial e o coeficiente de atrito sob diferentes relações h/b



Fonte: Gao *et al.* (2018, p. 8)

Choi *et al.* (1996) testaram três condições de contorno distintas para seus ensaios de compressão axial. Realizou ensaios de referência padrão sem utilização de nenhum método antifricção, com os espécimes em contato direto com pratos de aço da máquina de ensaio. Para reduzir a fricção de contato utilizou uma folha de teflon com 0,05mm de espessura nas superfícies de contato da amostra e também como outra condição de contorno, inseriu lubrificante nas faces de contato do espécime.

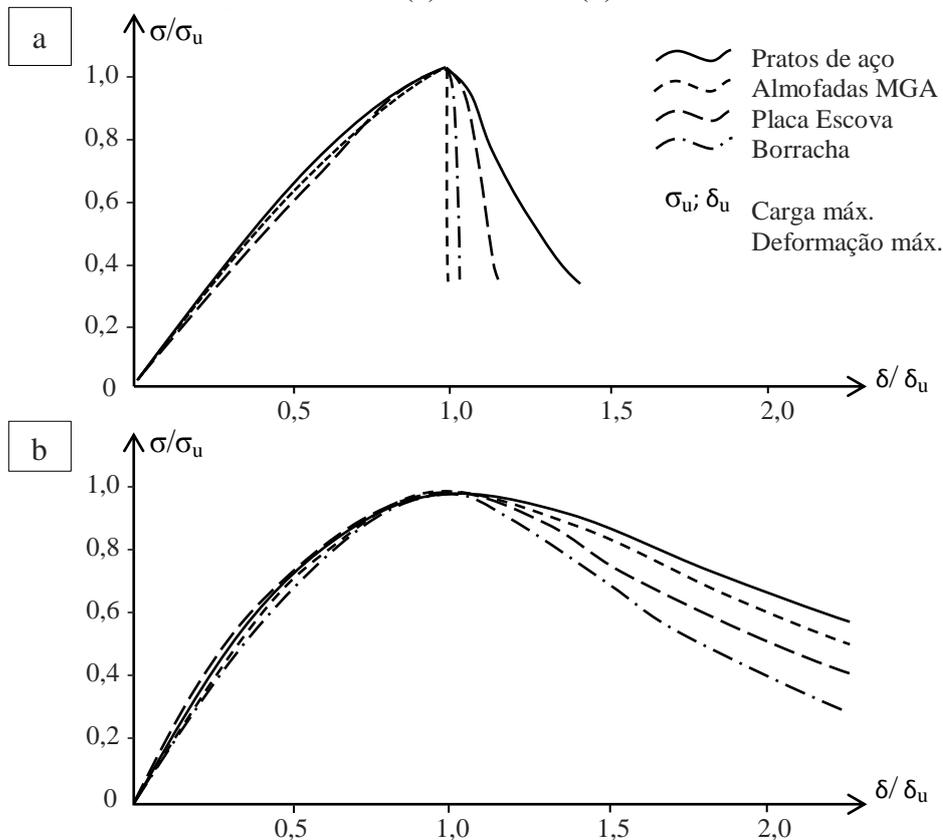
Os autores constataram que para relações  $h/b=2,0$  o comportamento mecânico pré-pico do concreto não foi modificado, como rigidez e resistência máxima à compressão. Porém, tratando-se do comportamento pós-pico, foi significativamente modificada em termos de inclinação para as diferentes condições de contorno. Os ensaios realizados com meios antifricção, como o teflon e o lubrificante, apresentaram curvas severamente mais inclinadas após alcançarem o pico de tensão comparado ao ensaio de referência. Quando o material alcança o pico de resistência, uma pequena expansão lateral nas extremidades de contato ocorre, enquanto uma grande expansão no centro do espécime é verificada. Ao reduzir a restrição de contato com condições de contorno antifricção, a expansão lateral no centro da amostra se torna menos dominante em relação à extremidade, reduzindo o confinamento e modificando o modo de ruptura verificado em ensaios padrão.

Kotsovos (1983) e Kumar *et al.* (2016) buscaram analisar como o concreto se comportava mecanicamente sob diferentes condições de contorno durante o ensaio. Ambos concluíram que para relações de  $h/d=2$  de esbelteza, a porção ascendente do gráfico tensão x

deformação não era afetada pela modificação das condições de contorno, no entanto para a porção descendente ambos constataram que o comportamento era dependente da técnica de ensaio. Resumidamente, conforme se reduz a restrição final dos espécimes mais íngreme se torna a curva, ou seja, mais frágil é a ruptura do material, o que descreve um comportamento mais realista para um material frágil como o concreto.

Kotsovos (1983) utilizou em seu experimento cubos de lados de 100 mm e cilindros de 250 mm de altura por 100 mm de diâmetro. Para realização dos ensaios de compressão uniaxial o autor utilizou quatro condições de contorno: (1) pratos de aço da máquina de ensaio, (2) uma camada de borracha sintética (neoprene) de 0,45 mm de espessura, (3) almofada MGA e (4) uma placa escova desenvolvida através da divisão longitudinal de uma chapa de aço para formar um grande número de "cerdas" individuais. O autor empregou dois traços de concreto, de 29 MPa e 50 MPa. Para os espécimes cúbicos foram retiradas somente as resistências finais, já para os cilindros também foi verificado comportamento tensão x deformação através de LVDT's. Quanto aos cubos observou-se que a resistência destes variava de acordo com a condição de contorno adotada, fato não ocorrente nos cilindros. Porém como já discutido, o comportamento pós-pico foi fortemente influenciado. Em relação a isso, um fato instigante é que para o concreto de 50 MPa a inclinação da curva era consideravelmente mais afetada do que no concreto de 29 MPa, constatando que quanto maior a resistência do concreto mais intenso é o efeito da restrição final à compressão, conforme mostra a Figura 15.

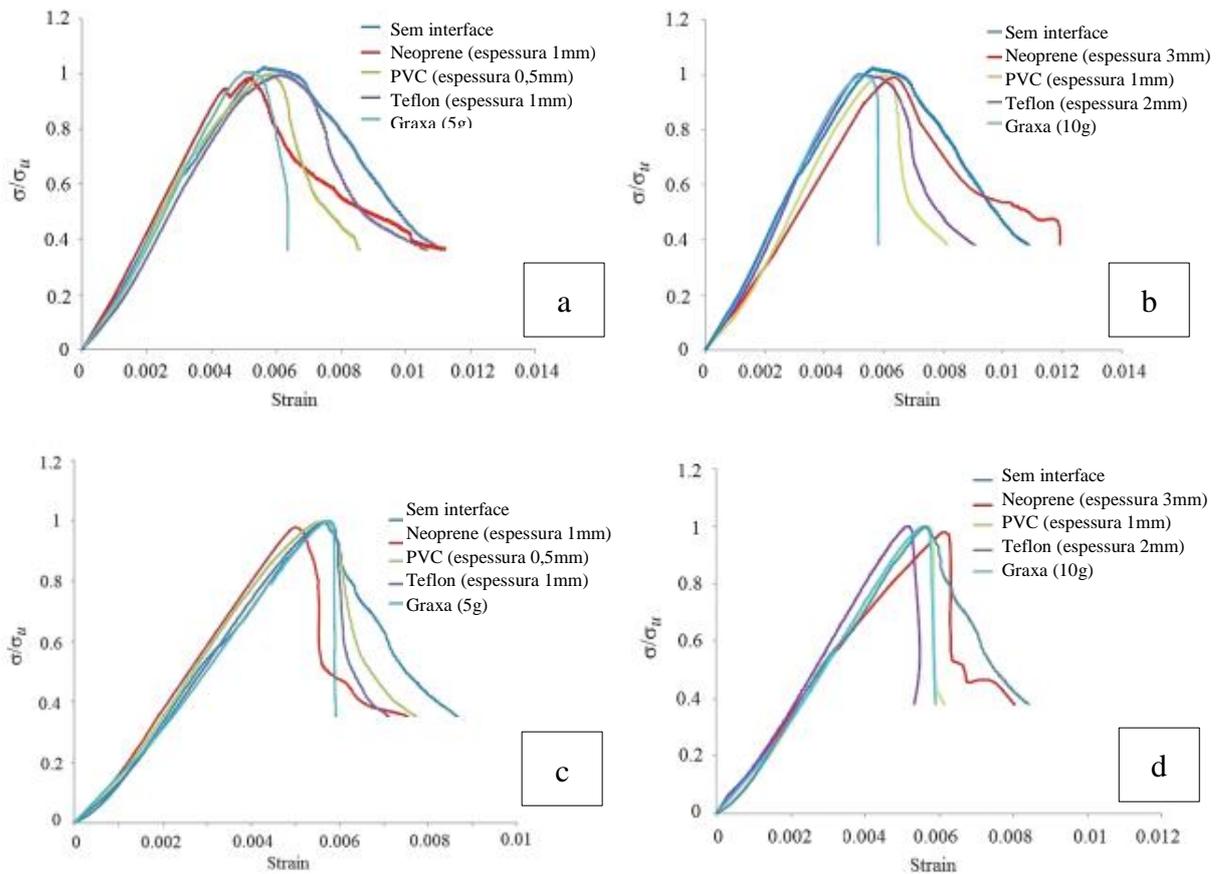
Figura 15 – Comportamento tensão x deformação encontrados por Kotsovos (1983): Concretos de resistência média de (a) 50 MPa e (b) 29 MPa



Fonte: Adaptado de Kotsovos (1983, p. 9)

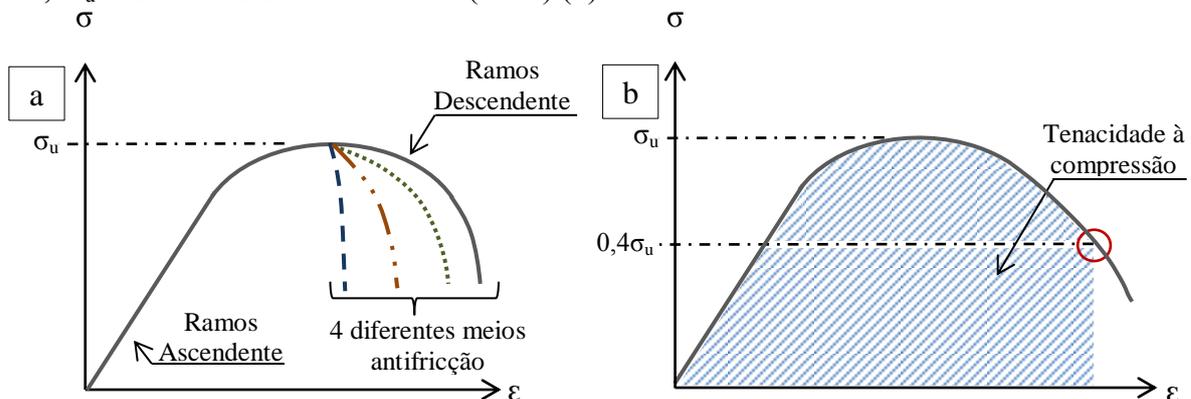
Kumar *et al.* (2016) avaliou em seu trabalho concretos de 25MPa e 50MPa, produzindo espécimes cilíndricos de 300 mm de altura por 150 mm de diâmetro, em seu experimento, além realização do ensaio de compressão padrão, utilizou quatro condições de contorno como dispositivos antifricção: neoprene, cloreto de polivinila - PVC, teflon e graxa. Devido ao fato mencionado por Kotsovos (1983), de que o ramo descendente da curva tensão-deformação descreve a interação entre o espécime e as placas de carga e não é representativo do comportamento do material, a graxa utilizada nos ensaios de Kumar *et al.* (2016) demonstrou melhor eficiência, visto que a inclinação pós-pico de tensão decaiu 90° abruptamente, indicando que a restrição da placa foi praticamente eliminada, fato igualmente constatado para as duas resistências de concreto, o que contrapõe ao encontrado por Kotsovos (1983). A Figura 16 apresenta os resultados encontrados por Kumar *et al.* (2016) para os concretos de 25MPa e 50MPa sob diferentes condições de contorno com diferentes espessuras. Através da Figura 17 (a) se verifica como os espécimes se comportam com a variação das condições de contorno em questão de tenacidade para cada condição de ensaio até 40% da tensão máxima

Figura 16 – Curvas tensão x deformação normalizadas para o concreto utilizando diferentes meios antifricção ( $\sigma$  e  $\sigma_u$  representam tensão e tensão última de compressão): (a) traço 25MPa com espessuras menores de condições de contorno; (b) traço 25MPa com espessuras maiores de condições de contorno; (c) traço 50MPa com espessuras menores de condições de contorno; (d) traço de 50MPa com espessuras maiores de condições de contorno



Fonte: Adaptado de Kumar *et al.* (2016, p. 598)

Figura 17. Representação da variação do comportamento tensão x deformação decrescente do concreto devido a diferentes meios antifricção hipotéticos (a) e a tenacidade determinada a  $0,4\sigma_u$  nos ensaios de Kumar *et al.* (2016) (b).



Fonte: Adaptado de Kumar *et al.* (2016, p. 598)

A Figura 18 apresenta um resumo dos resultados encontrados por autores que buscaram testar diferentes condições de contorno em ensaios de compressão uniaxial, visando minimizar a fricção de contato entre amostra e os pratos da máquina de ensaio, sendo estes os que demonstraram resultados e metodologias mais relevantes para o presente estudo.

Figura 18 – Resumo de resultados encontrados por autores que buscaram reduzir a restrição de contato em ensaios de compressão axial e estudar diferentes condições de contorno

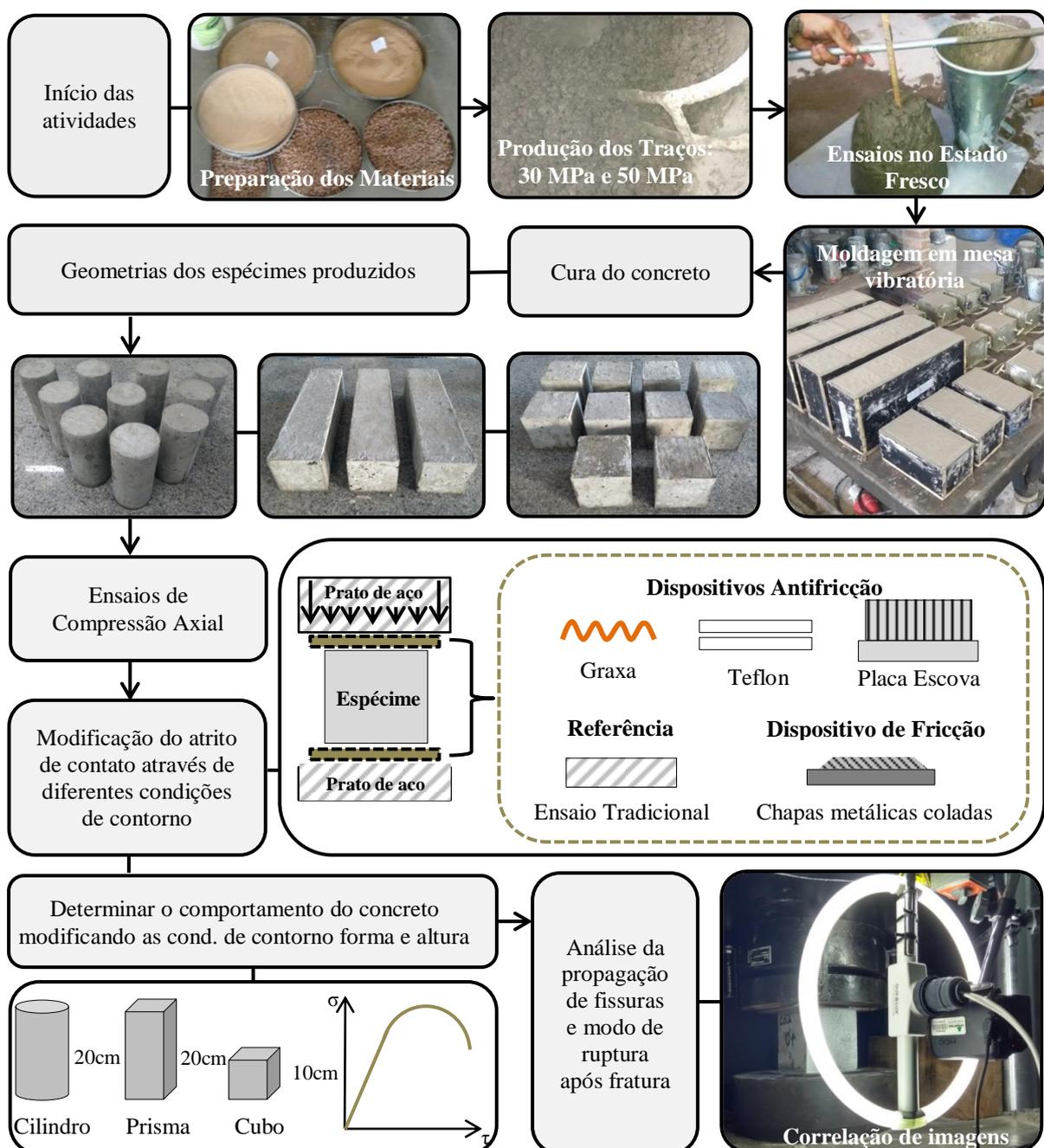
Trabalhos	Resumo dos resultados encontrados
Schickter (1973)	Executou ensaios em espécimes cúbicos de concreto em três condições de contorno: referência, chapas de alumínio intercaladas com graxa e placa escova. Constatou que as placas escova são mais eficazes na redução do efeito de fricção, determinou uma redução de resistência de 8% e 20% para chapas de alumínio e placa escova, em relação à referência, respectivamente.
Mazars (1984)	Ensaio de compressão em cubos de concreto com teflon nas faces de contato, os espécimes apresentaram resistência à compressão 40% menor que ensaios padrão. Verificou acentuada redução na absorção de energia do material após alcançar tensão máxima com a utilização de teflon.
Choi <i>et al.</i> (1996)	Utilizaram condições de referência, folhas de teflon e lubrificante. Constatou que para espécimes com $h/b=2$ o comportamento pré-pico não é modificado. Porém, o comportamento mecânico pós-pico ao utilizar os meios antifricção reduzem de maneira acentuada o amolecimento devido a fricção.
Van Mier <i>et al.</i> (1997)	Concluiu que placa escova e teflon são eficazes na redução da fricção, porém o teflon é mais acessível, visto que as placas não são comercializadas e são difíceis de desenvolver. Verificou que o teflon além de eliminar o amolecimento pós-pico, também compatibiliza as resistências máximas apresentadas por diferentes relações $h/b$ de espécimes cilíndricos.
Kotsovos (1983)	Kotsovos <i>et al.</i> (1983) analisou as condições de borracha, almofadas de MGA e placa escova para redução do amolecimento pós pico de espécimes cilíndricos de concreto. Constatou que borracha é mais

	eficaz para concretos de baixa resistência e almofadas de MGA para concretos de alta resistência.
Kumar <i>et al.</i> (2016)	Analisou espécimes cilíndricos submetidos à compressão em condições de contorno de neoprene, cloreto de polivinila - PVC, teflon e graxa. Verificou que a graxa é o melhor método visto que reduz significativamente o amolecimento pós-pico, o qual é resultado da restrição das faces de contato e não do material investigado.
Bandeira <i>et al.</i> (2019)	Os ensaios foram realizados para duas classes de concreto de baixa e alta resistência. Verificou-se uma variação média de 40% entre espécimes cúbicos ensaiados à compressão com graxa (restrição mínima) nas faces de contato e espécimes com as faces engastadas com cola (restrição máxima).
Vidal <i>et al.</i> (2020)	Os testes experimentais mostram que a relação entre a resistência à compressão não confinada e confinada, medida em amostras cúbicas de concreto, é em média 0,35 para concreto. Os autores ainda realizam simulações numéricas pelo Método de Elementos Discretos Lattice (LDEM) de ensaios com máximo e mínima restrição de apoio, encontrando resultados similares ao programa experimental desenvolvido.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e as normas referentes aos procedimentos e os equipamentos utilizados para caracterização das propriedades físicas e mecânicas do concreto, assim como a descrição dos métodos experimentais de compressão axial sob diferentes condições de contorno, altura, forma e método de correlação de imagens. A Figura 19 apresenta as etapas adotadas para o desenvolvimento do trabalho.

Figura 19 – Etapas da metodologia do estudo



Fonte: Elaboração própria

### 3.1 Materiais Utilizados

Para esta pesquisa foram moldados corpos de prova cilíndricos, prismáticos e cúbicos a partir de dois traços de concreto, possuindo estes, resistências equivalentes a 50 MPa e 30 MPa, denominados por C50 e C30, respectivamente. Os materiais utilizados para o estudo e suas respectivas proporções se apresentam na Tabela 1.

Tabela 1 - Traços dos concretos C30 e C50

Traço	Cimento	Areia	Brita	Água	a/c	Super-plastificante (%)	Teor de Argamassa (%)
	Consumo de material: kg/m <sup>3</sup> de concreto						
C-50	441,85	746,73	1020,67	189,99	0,43	0,075 da massa do cimento	53,82%
C-30	304,48	782,51	1062,63	207,04	0,68	-	50,57%

Fonte: Elaboração própria

#### 3.1.1 Agregados

Como agregado graúdo utilizou-se brita 1, a qual corresponde a uma pedra britada de formato predominantemente cúbico de origem basáltica. Em relação ao agregado miúdo, utilizou-se uma areia com granulação característica média. Na Figura 20 podem ser verificados os agregados utilizados nos traços de concreto desenvolvidos.

Figura 20 – Agregados utilizados na produção dos concretos: (a) Brita 1 e (b) Areia média



Fonte: Elaboração própria

A caracterização dos agregados foi realizada em laboratório seguindo todas as normas vigentes. Determinou-se a composição granulométrica dos agregados através de amostras representativas conforme a NBR NM 26 (ABNT, 2001), reduzindo-as e desenvolvendo o

ensaio granulométrico de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). A massa específica unitária foi realizada para ambos os agregados conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006). Para o agregado graúdo obtiveram-se as massas específicas aparente, saturada com superfície seca e agregado seco através da NBR NM 53 (ABNT 2003). A massa específica aparente para o agregado miúdo foi determinada conforme NBR NM 52 (ABNT, 2003).

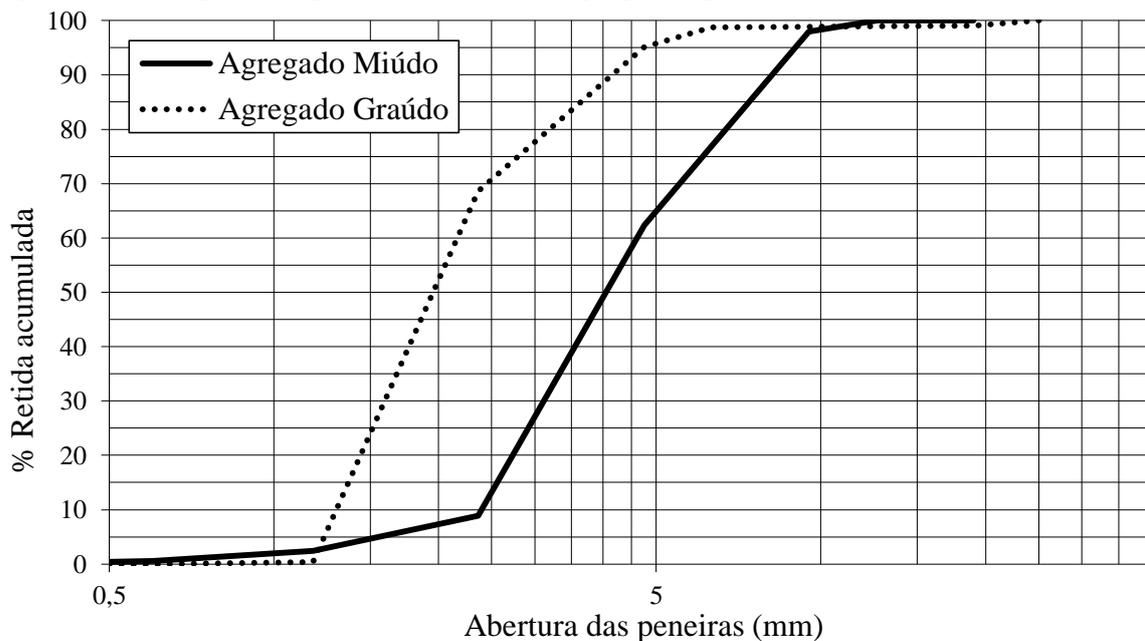
A Tabela 2 apresenta propriedades físicas dos agregados utilizados, assim como a dimensão máxima característica e módulo de finura e a Figura 21 a composição granulométrica dos agregados utilizados.

Tabela 2 - Propriedades físicas dos agregados utilizados

Propriedades dos agregados	Brita	Areia
Dimensão Característica (mm)	12,7	0,60
Módulo de Finura	5,60	1,72
Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,71	2,63
Massa Específica Agregado Seco (g/cm <sup>3</sup> )	2,88	2,58
Massa Específica Saturada Superfície Seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,79	2,60
Absorção de água (%)	1,94	-

Fonte: Elaboração própria

Figura 21 - Composição granulométrica dos agregados graúdo e miúdo



Fonte: Elaboração própria

### 3.1.2 Aglomerante

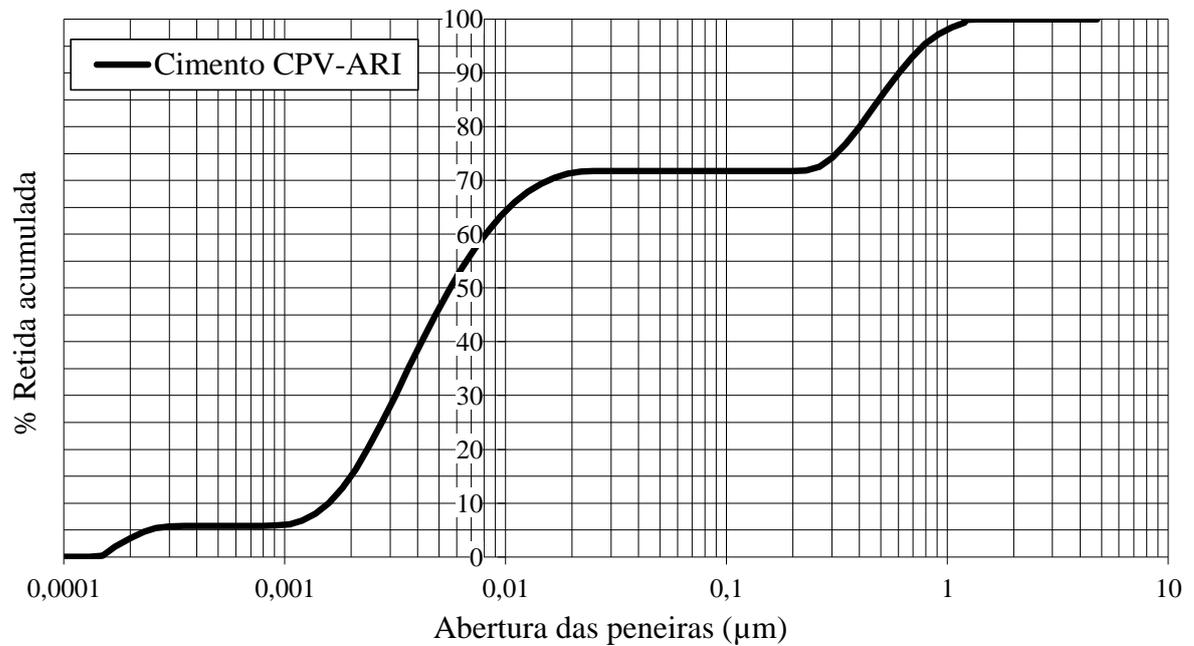
Quanto ao aglomerante para a produção de ambos os traços de concreto, utilizou-se cimento Portland do tipo CPV-ARI. A granulometria do cimento foi realizada com base na média de três amostras por meio da técnica de difração de raios laser com a utilização de um analisador de partículas (Malvern Mastersizer 2000 TM). O cimento pode ser visualizado pela Figura 22 e a sua curva granulométrica pela Figura 23.

Figura 22 – Cimento Portland utilizado na produção dos traços de concreto



Fonte: Elaboração própria

Figura 23 - Composição granulométrica do cimento CPV-ARI



Fonte: Elaboração própria

A massa específica do cimento foi determinada conforme o método com utilização do frasco de Le Chatelier, de acordo com os procedimentos descritos na NBR NM 23 (ABNT, 2001) no valor de 2,98 g/cm<sup>3</sup>.

### **3.1.3 Aditivo**

Devido a baixa relação água/cimento apresentada pelo concreto C50, necessitou-se da utilização de um superplastificante para melhorar a trabalhabilidade do material. O aditivo utilizado se trata de um superplastificante da empresa MC – Bauchemic Brasil Indústria e Comércio Ltda, situada na cidade de Tijuco Preto-SP. O aditivo apresenta densidade de 1,05 (g/cm<sup>3</sup>) e teores de cloretos e álcalis inferior a 0,1 (dados fornecidos pelo fabricante).

### **3.1.4 Água**

Para a produção do concreto foi utilizada água potável do sistema de abastecimento de água da cidade de Alegrete/RS. Sem impurezas ou contaminação que venha a prejudicar ou provocar qualquer reação no concreto.

## **3.2 Métodos Experimentais**

### **3.2.1 Produção dos Corpos de Prova**

Para produção dos traços de concreto C50 e C30, utilizou-se uma betoneira disponível no laboratório de Engenharia Civil (Figura 24(a)), a qual permitiu preparar o concreto de maneira mecanizada conforme as proporções de cada traço. Após a produção destes foram verificadas as consistências por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone no estado fresco conforme especifica a NBR NM 67 (ABNT, 1998) (Figura 24(b)). Os abatimentos encontrados foram de 10 cm e 14 cm para os concretos C50 e C30, respectivamente.

Figura 24 – Betoneira utilizada (a) e Slump Test (b)



Fonte: Elaboração própria

Para o programa experimental, produziram-se um total de 121 espécimes, dividindo-se entre os dois tipos de concreto analisados, C50 e C30, em três geometrias distintas: cilindros, de altura ( $h$ )=20cm e base( $b$ )=10cm, prismas com  $h$ =20cm e  $b$ =10x10cm e cubos com lados de 10cm. A produção dos espécimes cilíndricos e cúbicos foi realizada através de formas metálicas e para os prismas foram desenvolvidas formas de madeira, as quais antes do lançamento foram revestidas internamente com óleo mineral e adensadas mecanicamente por meio de uma mesa vibratória disponível em laboratório. Na Figura 25 constam as formas utilizadas e as três geometrias adotadas para os corpos de prova, como se pode observar as faces dos cubos e prismas se encontram pigmentadas para o procedimento de correlação de imagem.

Figura 25 – Formas e geometrias de espécimes adotadas para o programa experimental: espécimes cilíndricos (a), prismáticos (b) e cúbicos (c)





Fonte: Elaboração própria

Conforme a ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015), os espécimes permaneceram em seus moldes para a secagem por um período de 48 horas em local protegido de intempéries. Decorrido este período, os corpos de prova foram desformados, identificados e colocados à cura em câmara úmida à temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar superior a 95 %.

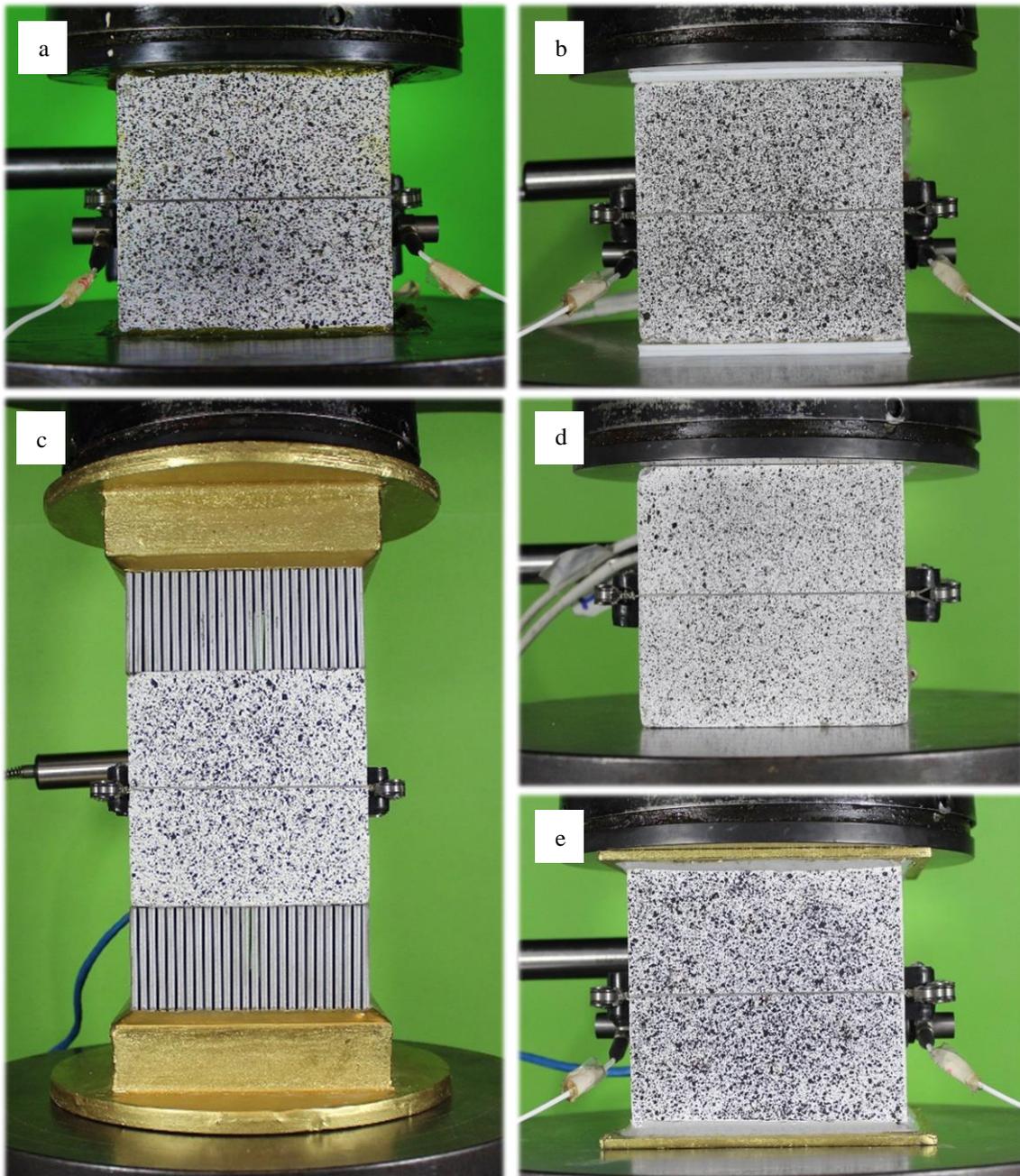
### 3.2.2 Condições de Contorno Utilizadas

Para analisar o efeito de restrição em ensaios de compressão axial, desenvolveram-se cinco condições de contorno, as quais podem ser verificadas conforme Figura 26. Três se tratam de dispositivos antifricção com intuito de reduzir a restrição de contato: Uma camada de graxa (utilizada para rolamentos, produzida com sabão de lítio e óleo de viscosidade média, para temperaturas moderadas) nas faces de contato dos espécimes de concreto (a). Duas folhas de teflon com espessura de 2,0 mm em cada face de contato (b) e placa escova, a qual é composta por um conjunto de tiras metálicas unidas por um bloco metálico como base (c), esta foi produzida especificamente para esse trabalho conforme item 3.2.2.1 devido a não comercialização do aparato.

Além dos meios antifricção, realizaram-se ensaios padrão como referência (d) e ensaios que visam maximizar a restrição de contato por meio de chapas metálicas de aço com espessura de 3,0 mm coladas nas faces dos espécimes, visando proporcionar fricção máxima

de contato, como um engaste (e). Estas configurações de ensaio permitem verificar como seria o comportamento de um espécime que eventualmente fosse submetido a um ensaio de compressão axial sob condições de máxima fricção, possibilitando a comparação entre extremos de fricção e também com os próprios ensaios referência.

Figura 26 - Condições de contorno utilizadas: graxa (a), teflon (b), placa escova (c), referência (d) e chapas coladas (e)



Fonte: Elaboração própria

### 3.2.2.1 Produção da Placa Escova

As Placas Escova desenvolvidas para este trabalho, foram baseadas nos aparatos apresentados nos trabalhos de Linse (1973), Schickter (1973), Torrenti e Royis (1989), Page e Kleeman (1991), Torrenti e Djebri (1995). Estas placas se objetivam a eliminar o efeito de restrição dos pratos da máquina de ensaio por meio de um conjunto de cerdas metálicas que aplicam o carregamento no espécime, permitindo a deformação transversal através da movimentação das cerdas.

As cerdas utilizadas para as placas são de aço inox possuindo diâmetro de 1/8”, autores como Linse (1973), Schickter (1973), Torrenti e Royis (1989) utilizaram para suas placas cerdas de seção retangular. No entanto, optou-se pela seção circular para que as cerdas não apresentem inércias diferentes independente da direção que fossem movimentadas, evitando a possibilidade de fricção na face de contato.

Devido às dimensões dos espécimes realizou-se o corte de 676 cerdas de aço inox para cada uma das placas desenvolvidas com um comprimento de 8,0 cm, calculados para não ocorrência de flambagem durante o ensaio de compressão. Para o corte foi utilizado uma cortadora metalográfica apresentada na Figura 27 (a). Posteriormente, para retirar possíveis defeitos nas extremidades de cada cerda de aço, todas foram lixadas por meio de uma lixadeira metalográfica de bancada Figura 27 (b).

Figura 27 – Cortadora (a) e lixadeira metalográfica (b)

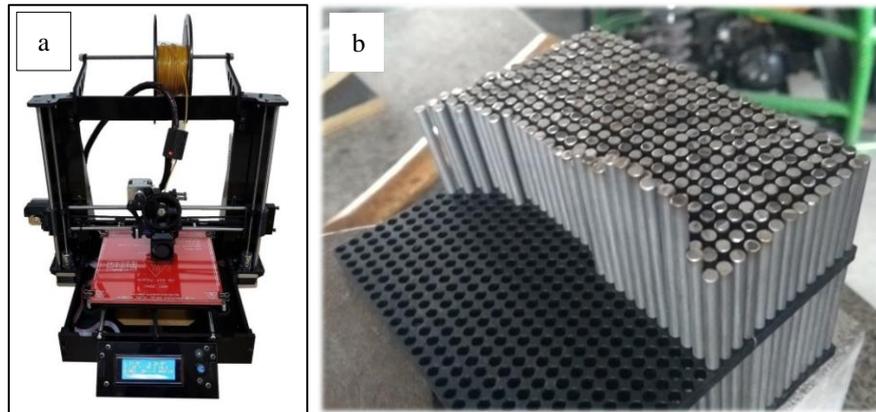


Fonte: Elaboração própria

Para realizar o espaçamento milimétrico entre as cerdas de aço da placa escova, desenvolveram-se moldes de plástico com uma impressora 3D FDM com resolução de impressão de 0,05 mm. Devido ao bico da impressora possuir 0,4 mm, este foi o menor espaçamento possível a ser adotado entre as cerdas de aço. Na Figura 28 se pode verificar o

espaçador desenvolvido e a as cerdas sendo inseridas individualmente para a montagem das placas.

Figura 28 – Impressora 3D (a) e Espaçador de cerdas (b)



Fonte: Elaboração própria

Como base das placas escovas, soldaram-se 4 cantoneiras de aço com espessura de 3mm e uma chapa de aço de 5mm de fundo. Posteriormente procedeu-se com o engastamento das cerdas metálicas neste molde de aço, para isso utilizou-se o Sikadur 32, um adesivo estrutural à base de resina epóxi, de baixa viscosidade, bi-componente e de pega normal. A cola utilizada e o procedimento para colar as barras de aço ao molde podem ser verificados pela Figura 29.

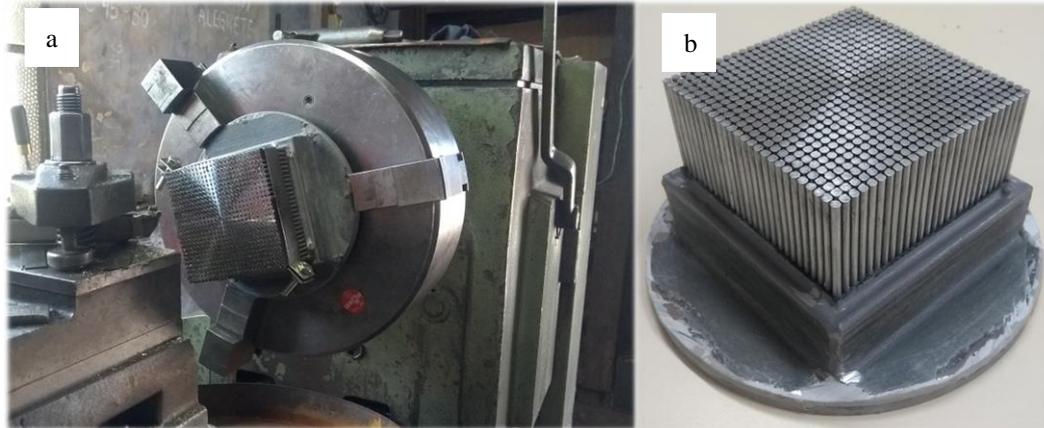
Figura 29 – Cola estrutural (a) e processo de fixação das cerdas no molde (b)



Fonte: Elaboração própria

Após a colagem das cerdas de aço no molde aguardou-se um período de 48 horas para manusear o aparato. Corrigiram-se as imperfeições superficiais das extremidades das barras de aço que aplicam diretamente o carregamento no espécime, para isso realizou-se uma retificação da superfície das barras em um torno mecânico, como pode ser verificado pela Figura 30.

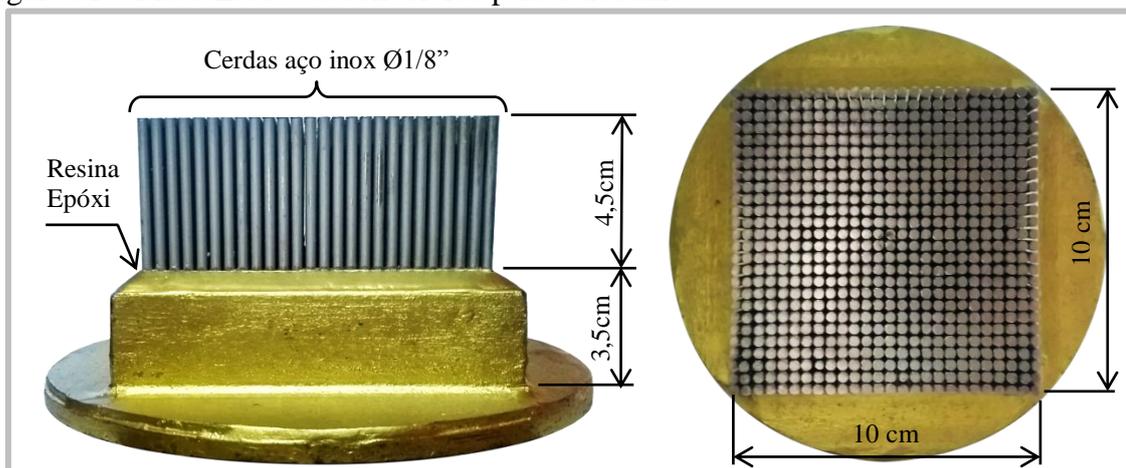
Figura 30 – Torno mecânico (a) e aparato após retificação (b)

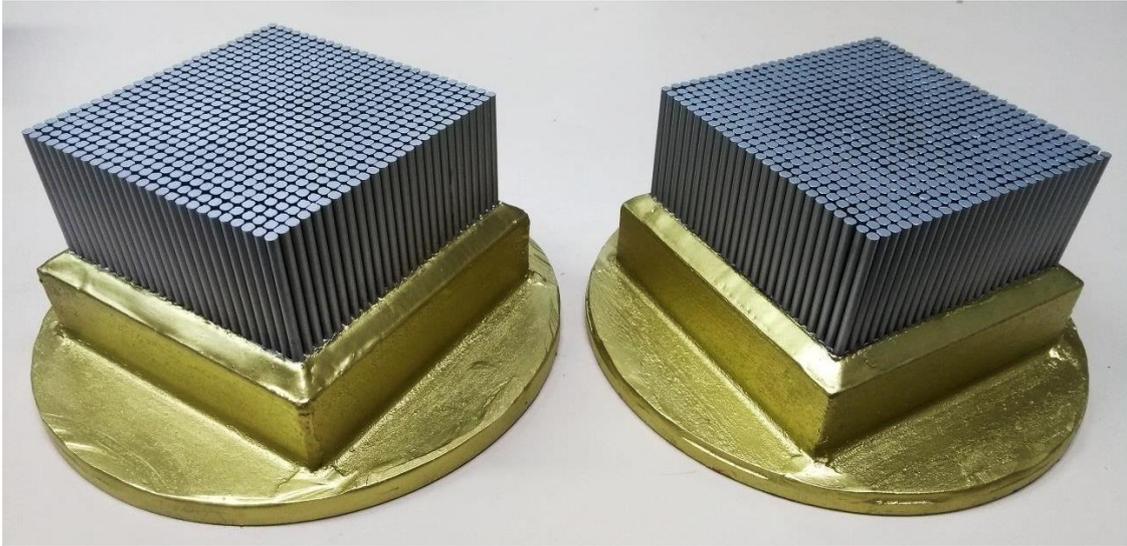


Fonte: Elaboração própria

Posterior à realização da retificação, um dos separadores de barras ficou retido na extremidade das cerdas de aço, para retirar o separador de plástico sem prejudicar a integridade das cerdas, mergulharam-se as extremidades das mesmas em acetona pura 99% por um período de 24 horas para eliminação total do plástico. As dimensões finais da placa escova, assim como o acabamento realizado na parte externa podem ser verificadas na Figura 31.

Figura 31 – Placa Escova desenvolvida para o trabalho



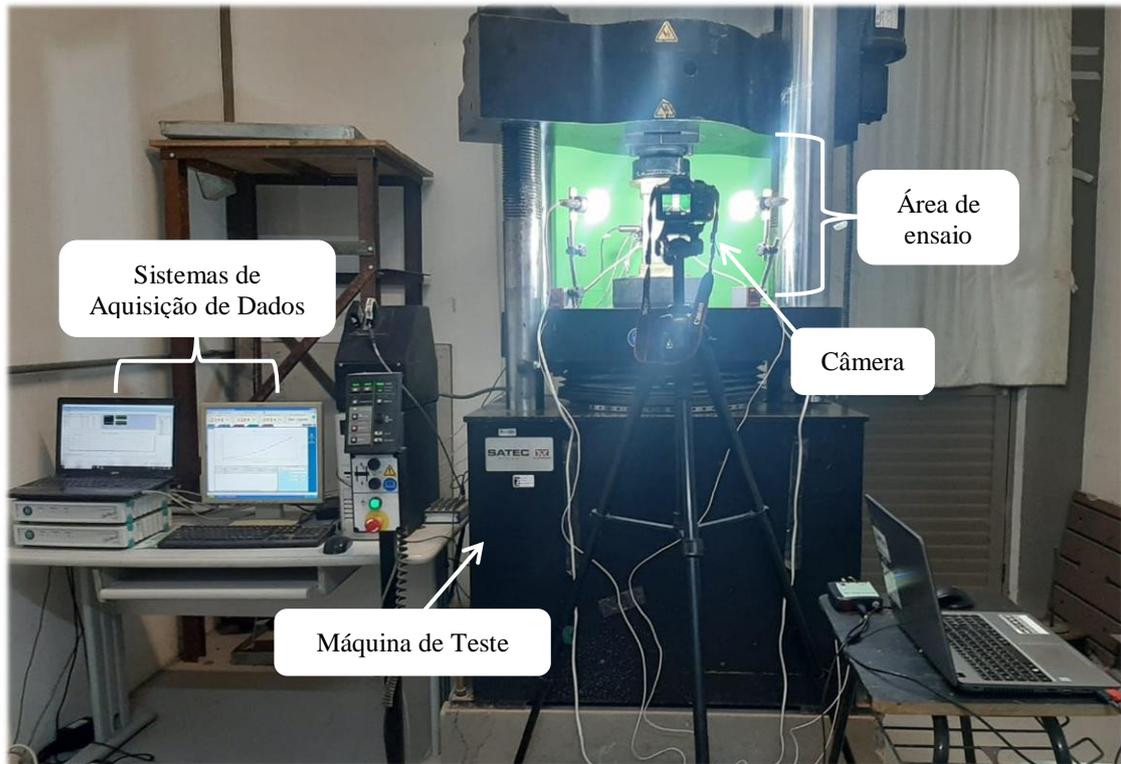


Fonte: Elaboração própria

### 3.2.3 Ensaios de Caracterização Mecânica

Os ensaios de compressão axial foram realizados com base na NBR 5739 (ABNT, 2007) através de uma máquina de Sistema Hidráulico Estático de Testes Universais, modelo SATECTM 5590-HVL Series, da marca INSTRON® com capacidade de 1500 kN, em que para todos ensaios utilizou-se uma taxa de carregamento de 0,05 mm/min. O sistema permite leitura simultânea dos dados referentes a deslocamento vertical do prato de aço e deformações captadas através de extensômetros, assim como registro do carregamento aplicado. O sistema para realização dos ensaios mecânicos pode ser observado conforme Figura 32. O número de espécimes ensaiados por traço de concreto para cada condição de contorno e geometria adotada pode ser verificado pela Tabela 3. Para o concreto C50, quando analisado o primeiro espécime cilíndrico com placas escova, ocorreu uma falha explosiva que danificou as mesmas. Por este motivo não foram realizados os demais ensaios com placas escova e corpos de prova cilíndricos, descartando assim esse primeiro ensaio.

Figura 32 - Equipamento para os ensaios mecânicos e aquisição dos dados



Fonte: Elaboração própria

Tabela 3 – Número de corpos de prova para cada configuração de ensaio

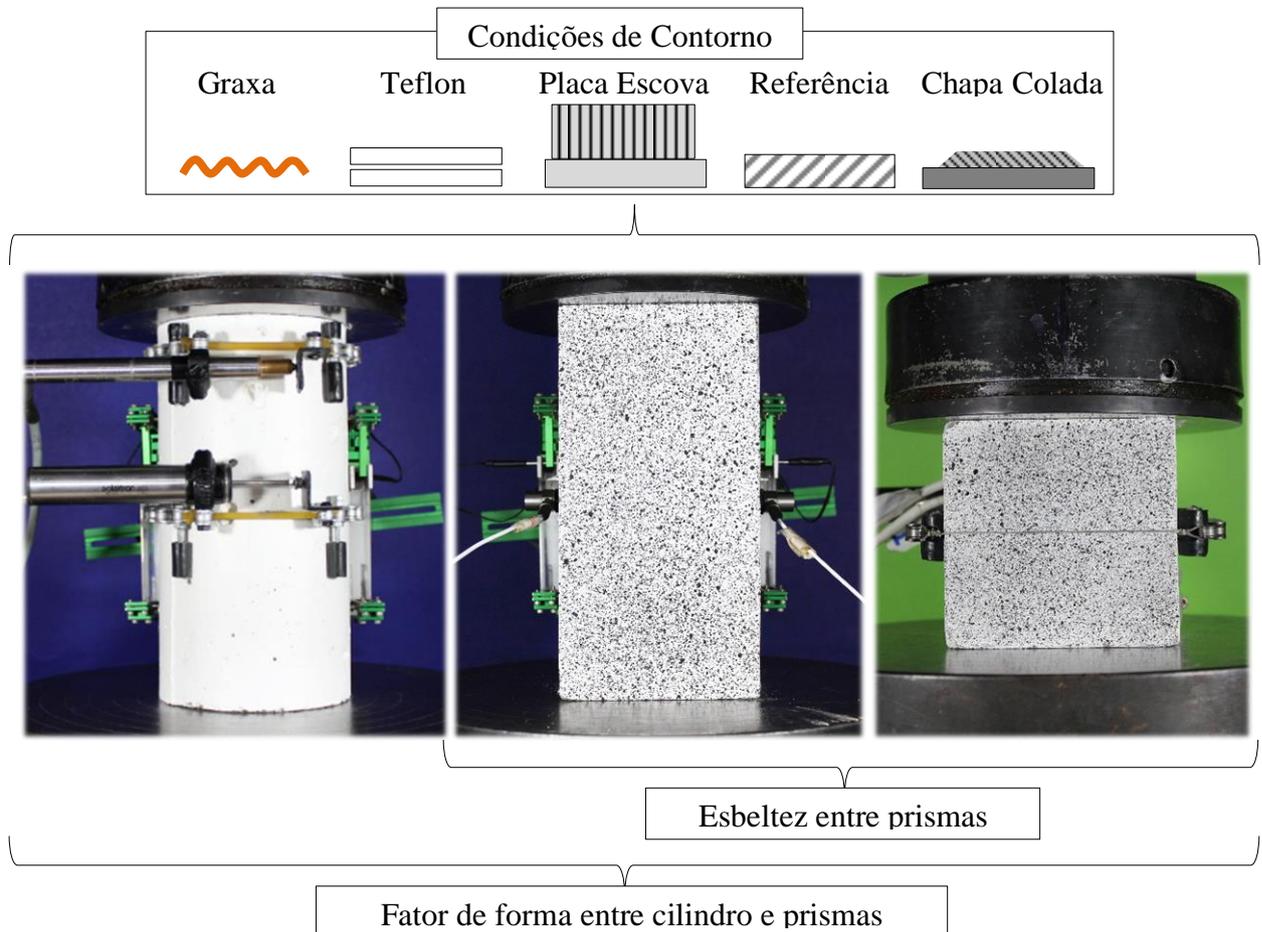
Cura (dias)	Traço	Geometria	Nº de espécimes / Condição de contorno				
			Graxa	Teflon	Placa Escova	Referência	Chapas Coladas
28	C30	Cilindro	-	4	4	4	4
		Prisma	-	4	4	4	4
		Cubo	-	4	4	4	3
28	C50	Cilindro	5	5	-	5	5
		Prisma	5	5	5	5	5
		Cubo	5	5	5	5	5

Fonte: Elaboração própria

Ensaíram-se à compressão axial espécimes a partir de dois traços de concretos em diferentes condições de contorno e geometrias, analisando os comportamentos mecânicos para cada configuração de ensaio. Portanto, é possível analisar a influência da fricção entre espécimes prismáticos com alturas diferentes e ainda comparar os resultados encontrados entre diferentes formas, no caso entre prismas e cilindros. Se tratando do mesmo material, é interessante que busquem condições de contorno que compatibilizem o comportamento

mecânico entre espécimes de diferentes geometrias e esbeltez. A Figura 33 organiza de maneira visual o programa experimental empregado.

Figura 33 – Esquema do programa experimental empregado no trabalho



Fonte: Elaboração própria

### 3.2.4 Instrumentação para os Ensaios Mecânicos

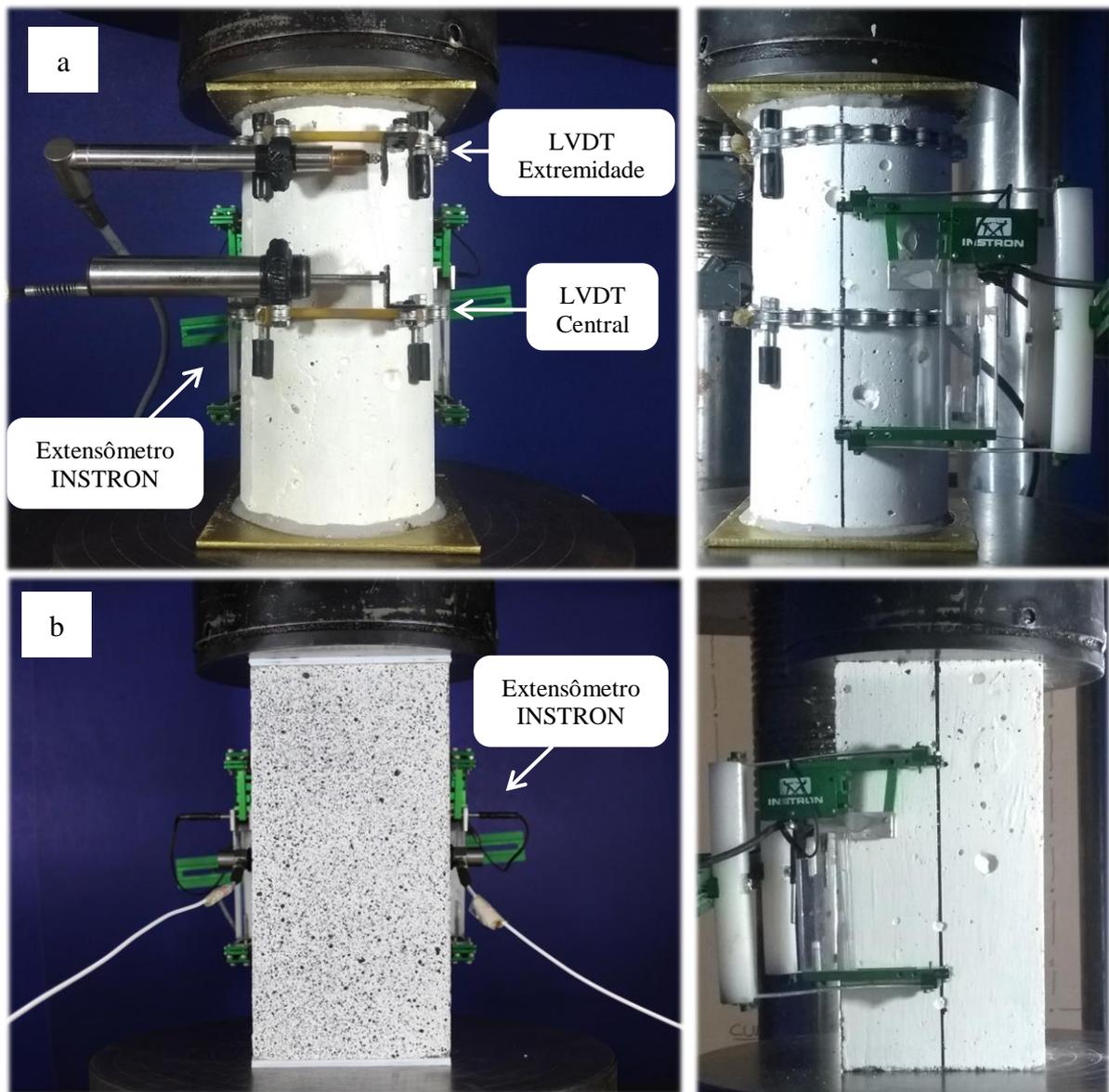
A instrumentação dos espécimes para aquisição de deslocamentos foi realizada de acordo com a geometria dos mesmos conforme Figura 34. Para espécimes cilíndricos (Figura 34 (a)) obteve-se o deslocamento vertical com um Extensômetro INSTRON, assim desenvolveram-se as curvas tensão x deformação para análise do comportamento mecânico.

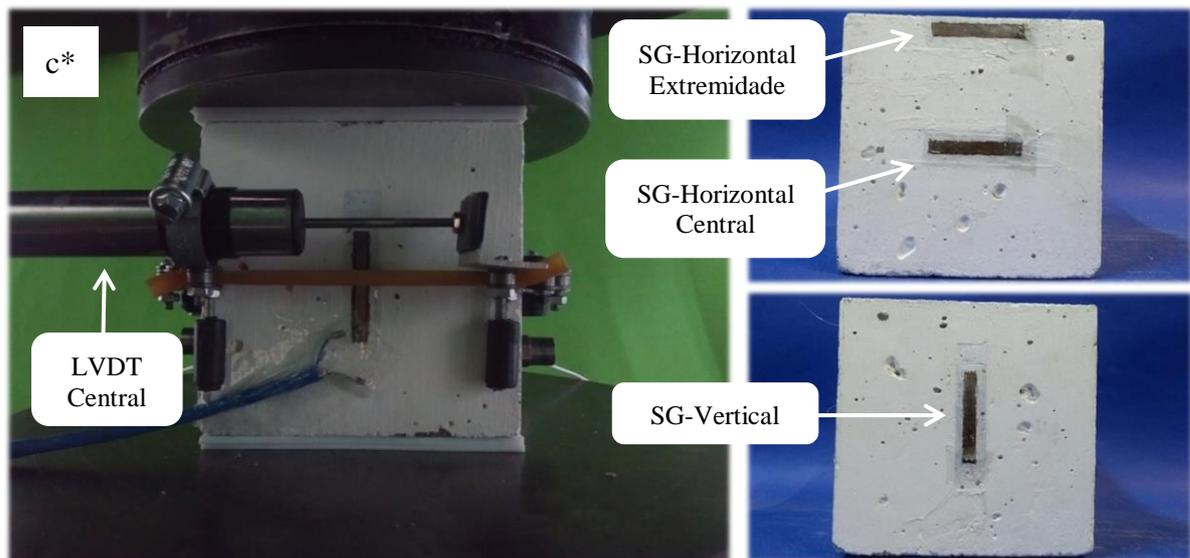
Ainda foram desenvolvidos dispositivos para determinação da deformação horizontal dos espécimes cilíndricos, os quais são compostos de correntes que permitem acoplar LVDT's (Linear Variable Differential Transformer - Transformador Diferencial Variável Linear). Estes foram posicionados na extremidade e no centro dos espécimes, justamente para que se

possa verificar a diferença de deformação entre estes dois pontos e analisar a influencia da restrição de contato para as diferentes condições de contorno empregadas.

Para os espécimes prismáticos (Figura 34 (b)) somente o extensômetro para captação do deslocamento vertical foi utilizado. No entanto, para espécimes cúbicos (Figura 34 (c)) foram utilizados SG's (Strain Gages) para obtenção da deformação vertical e para as deformações horizontais de extremidade e centro. Para os cubos além dos SG's, ainda se empregou um dispositivo de corrente com LVDT acoplado para leitura do deslocamento horizontal de centro.

Figura 34 – Instrumentação para as geometrias de espécimes adotadas para C30 e C50





Fonte: Elaboração própria

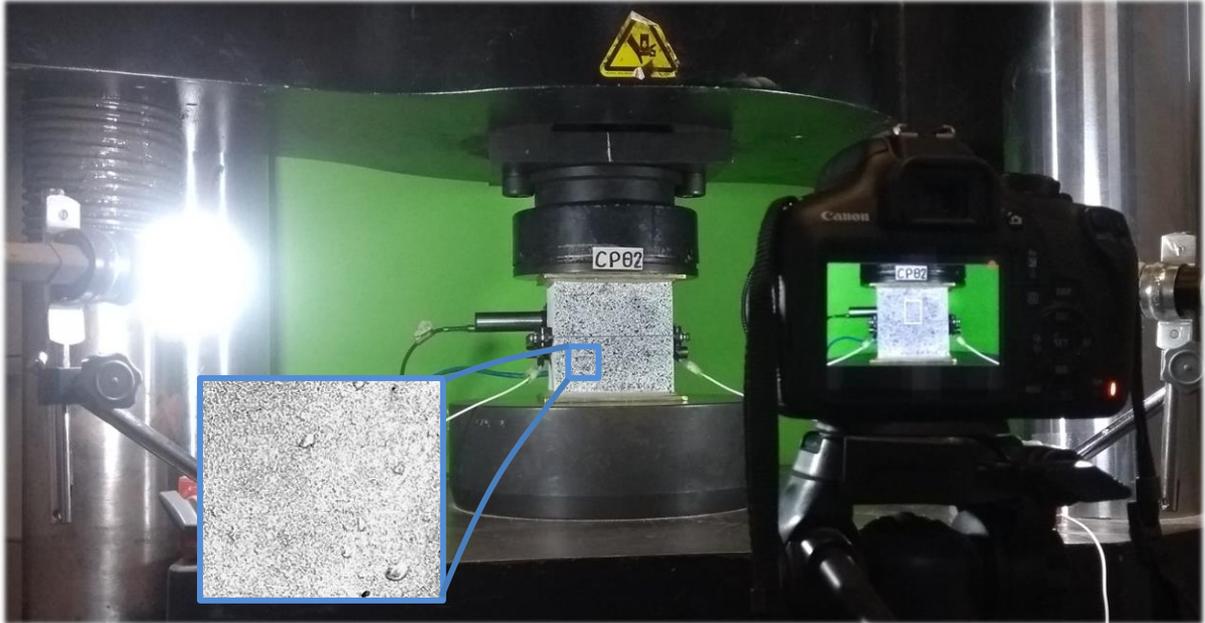
\* Para os espécimes cúbicos colaram-se SG's e acoplou-se um LVDT com corrente no centro para captação das deformações horizontais como mostra Figura 34c, porém os resultados determinados não foram satisfatórios possivelmente pela leitura em somente uma face dos cubos, imperfeições superficiais e fissuração no sentido ortogonal a disposição dos SG's que inviabilizavam ou distorcem a leitura de maneira abrupta.

### 3.2.5 Procedimento de Correlação Digital por Imagem

Os espécimes prismáticos e cúbicos tiveram uma de suas faces preparadas com um fundo branco de tinta PVA e uma pigmentação preta aplicada por uma tinta preta aerossol com padrão aleatório, produzindo um padrão estocástico para permitir a utilização da correlação digital por imagem.

Para esse procedimento filmaram-se os ensaios com uma câmera digital de alta resolução (1920x1080 pixels), com uma taxa de captura de 30 quadros por segundo com o auxílio de uma lâmpada circular fluorescente. Após obtenção destes dados utilizou-se o *software GOM Correlate* para o procedimento de mapeamento de fissuração por correlação de imagem. Na Figura 35 é possível verificar a preparação do ambiente de teste para os ensaios filmados.

Figura 35 - Ambiente de teste para ensaios de compressão axial com correlação de imagem



Fonte: Elaboração própria

## 4. RESULTADOS

No presente trabalho os resultados obtidos serão apresentados em forma de artigo. O artigo desenvolvido será submetido a uma revista com fator de impacto após ser traduzido para a língua solicitada pela revista. Além dos resultados apresentados no artigo em anexo, resultados prévios determinados ao longo da pesquisa viabilizaram outras publicações. Os autores que estão no artigo se tratam do orientador e co-orientador deste trabalho, os Doutores Kostas L. E. e Marangon E, assim como um colaborador que acompanhou todos os ensaios laboratoriais realizados, o engenheiro La Torre K. R. Por fim, também será coautor desse artigo o Dr. Riera J. D. que em várias reuniões e conversas forneceu inúmeras sugestões quanto ao tema de amenizar a restrição de contato em ensaios de compressão axial. No Apêndice I se encontram todos os modos de ruptura registrados fotograficamente, assim como imagens da distribuição de fissuras das faces de contato dos espécimes. No Apêndice II estão apresentadas imagens dos mapas de fissuração dos espécimes ensaiados e gerados por correlação digital de imagens.

### 4.1 Resultados prévios publicados

Em Bandeira *et al.* (2020) foram desenvolvidos ensaios de compressão axial em espécimes cúbicos com lados de 10cm nas condições de mínima fricção, com a utilização de graxa, máxima fricção, com utilização de chapas metálicas com 3,0 mm de espessura coladas nas faces de contato e ensaios de referência sem utilização de interface. Os ensaios foram realizados em concretos de 30 MPa e 65 MPa. Determinou-se uma variação de 40% entre os casos com graxa e com chapas metálicas coladas, independente da classe de concreto.

Para Vidal *et al.* (2020), onde se realizaram ensaios de compressão axial em espécimes cúbicos com mínima e máxima restrição de contato, no caso com a utilização de teflon e com chapas de aço coladas, respectivamente. Determinou-se que a relação entre a resistência à compressão de ensaio sem e com fricção, medida em amostras cúbicas de concreto, é em média 0,35. A utilização do Método de Elementos Discretos Lattice (LDEM) implementado no software Abaqus / Explicit permitiu verificar de modo computacional o comportamento apresentado no programa experimental, tanto em termos de propriedades mecânicas como no próprio modo de fratura.

## 4.2 Artigo Completo

### INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO E GEOMETRIA DOS ESPÉCIMES EM RESPOSTA À COMPRESSÃO AXIAL

Matthews Vargas Vaucher Bandeira<sup>a</sup>, Kevin Rebolledo La Torre<sup>a</sup>, Luis Eduardo Kostas<sup>ki</sup><sup>\*</sup>, Ederli Marangon<sup>a</sup>, Jorge Daniel Riera<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Engineering Post Graduation Program and MAEC Group, Federal University of Pampa - Campus Alegrete, Av. Tiaraju, 810, Alegrete - RS / Brazil.

<sup>b</sup> Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil

\* corresponding author: luiskostas@gmail.com.

**RESUMO:** Neste trabalho se apresenta um estudo experimental sobre a influência do tipo de concreto, condições de contorno e a geometria dos espécimes no teste de compressão axial. Com este intuito um programa experimental de 104 espécimes foi desenvolvido, dividindo-se entre cilindros de altura (h)=20cm e base (b)=10cm, prismas com h=20cm e b=10x10cm e cubos com lados de 10cm. Utilizaram-se dois traços de concreto com resistências de 50MPa (C50) e 30 MPa (C30). Os testes de compressão foram realizados em cinco condições de contorno: graxa, teflon e placa escova, como meios antifricção. Para referência, ensaio tradicional normatizado e chapas coladas, visando maximizar a fricção de interface. Quanto menor a relação entre altura/base (h/b) do espécime, maior é a resistência à compressão axial e a tenacidade do material. A diferença de resistência entre relações h/b=2 e h/b=1 variam em média de 15% para C50 e 35% para C30. Quando utilizados os meios antifricção, eliminou-se a variação de resistência para as diferentes geometrias e relações h/b, assim como se reduziu significativamente o amolecimento pós-pico dos ensaios, comportamento não característico do material resultado da fricção de interface.

**Palavras-Chave:** Condições de contorno. Comportamento mecânico. Compressão axial.

## 1. INTRODUÇÃO

Em testes de compressão axial, a restrição de contato entre a amostra e os pratos da máquina de ensaio resulta em condições de contorno que podem influenciar diretamente nos resultados do ensaio. No caso de materiais frágeis, a restrição nas faces de contato dos

espécimes é responsável por consideráveis modificações não só na resistência máxima à compressão, como na ductilidade, absorção de energia e o modo de ruptura, apresentando assim parâmetros que não representam as reais propriedades do material [1, 2, 3]. Os ensaios são reproduzidos pela aplicação de carga em um corpo de prova através de placas rígidas de aço, devido à fricção entre os materiais, forças cisalhantes se originam resultando em uma contenção da deformação lateral e em um estado triaxial de tensões próximo as regiões de contato do espécime [4,5,6]. A influência no comportamento mecânico dos corpos de prova em razão deste efeito, ainda não é bem definida, todavia é importante que se reduza a restrição de contato para que se reproduza um ensaio de compressão axial mais próximo do ideal [7].

Devido à interferência da restrição em ensaios de compressão axial, diversos trabalhos buscaram a redução da fricção de interface avaliando diferentes meios antifricção. Autores como Torrenti e Royis [8], Sagong, Kim e Park [9], Foltz, Lee e LaFave [10] desenvolveram aparatos compostos de cerdas de aço que aplicam o carregamento permitindo o deslocamento lateral dos espécimes durante a compressão, os quais são chamados de placas escova. Bresler e Pister [11] e Iyengar *et al.* [12] utilizaram um conjunto de rolamentos esféricos para redução do atrito. Também se encontram trabalhos que utilizam teflon nas faces de contato, como Erdei [13], Barbosa [14], Christiansen, Martins e Bay [15] e Xu *et al.* [3], e comparações entre diferentes meios antifricção, como borracha (neoprene), PVC, graxa, almofadas MGA (filme de poliéster, uma camada de graxa e uma folha de alumínio), teflon e placas escova foram desenvolvidos por Kotsovos [7] e Kumar *et al.* [2].

Ainda não se tem um consenso entre os autores sobre qual o melhor método antifricção a ser utilizado em ensaios de compressão. Kupfer, Hilsdorf e Rusch [16] e Torrenti e Royis [8] afirmam que a utilização de placas escova para ensaios de compressão são o método mais eficiente de eliminar a restrição. Para van Mier *et al.* [17] e Lee, Song e Han [18] o teflon é mais eficaz que as placas escovas e também mais prático devido a complexidade de fabricação e a não comercialização dos aparatos. Entretanto, Kumar *et al.* [2] afirma que a utilização de graxa é mais eficiente que teflon. As diferentes conclusões encontradas pelos autores são decorrentes de uma série de fatores, como dimensões de espécimes e resistência dos concretos utilizados.

O confinamento por fricção em ensaios de compressão axial possui relação direta com a esbeltez do espécime utilizado, em que quanto menor a relação  $h/b$  maior é o confinamento gerado e, portanto maior a resistência à compressão [19]. Van Mier *et al.* [17] verificou que

espécimes com  $h/b=0,25$  podem apresentar 2x a resistência à compressão de espécimes com  $h/b=2,00$  para o mesmo material e que quando utilizado chapas de teflon como meio antifricção essa variação de resistência é eliminada. Quando utilizados cubos para realização de ensaios de compressão, este efeito é bastante significativo, no caso de Mazars [20], verificou-se que ao utilizar teflon como condição de contorno, a resistência dos espécimes cúbicos quando comparados a ensaios de referência podem reduzir em média 50%. Assim como para Schickter [4], o qual identificou uma redução de 20% para ensaios com utilização de placa escova e 8% para chapas de alumínio intercaladas com lubrificante. Vidal *et al.* [21] avaliou o efeito de anisotropia do concreto e a as condições de contorno impostas em ensaios de compressão axial. Os autores verificaram que a relação entre a resistência à compressão não confinada e confinada, medida em amostras cúbicas de concreto, é em média 0,35. A utilização do Método de Elementos Discretos Lattice (LDEM) implementado no software Abaqus/Explicit permitiu verificar a interação entre estes efeitos. O efeito de anisotropia é maximizado quando a condição de contorno é sem fricção. Fato também confirmado por autores como Bandeira *et al.* [22] e Kostaski *et al.* [23].

Além de a resistência máxima ser significativamente influenciada pelo fricção em ensaios de compressão, o comportamento pós-pico do material também é bastante modificado. Devido ao efeito de fricção, ensaios de compressão em materiais frágeis apresentam elevada absorção de energia após alcançar tensão máxima, demonstrando um comportamento dúctil que não é característico do material [2, 7, 17]. A interferência da restrição de contato também pode ser verificada no modo de ruptura dos espécimes ensaiados, pois devido à fricção, a fratura apresenta um formato tronco-cônico, também conhecido como ampulheta, o qual revela o confinamento de tensões presente nas extremidades dos espécimes. Todavia, tratando-se de ensaios de compressão axial espera-se que durante o ensaio ocorra uma gradual propagação de fissuras verticais paralelas a direção de aplicação do carregamento, este efeito é comentado tanto em trabalhos mais antigos como Kotsovos [7] aos mais atuais, como Bezerra *et al.* [24] e Xu *et al.* [3]. Este efeito também está relacionado com a forma e a altura dos corpos de prova, os quais podem atenuar ou intensificar o efeito de fricção [25, 26, 27].

Para este trabalho desenvolveram-se espécimes cilíndricos, prismáticos e cúbicos através de duas resistências de concreto de 50 MPa e 30 MPa, são utilizadas cinco condições de contorno, três referentes a meios anti-fricção, como graxa, teflon e uma placa escova desenvolvida exclusivamente para este trabalho. Ensaio de referência executado de maneira

tradicional e um ensaio de máxima fricção com chapas metálicas coladas nas faces de contato do espécime. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência das condições de contorno, verificando qual a mais eficiente em reduzir a fricção em ensaios de compressão, avaliando o comportamento mecânico do concreto para cada configuração de ensaio proposta.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Para esta pesquisa foram moldados corpos de prova a partir de dois traços de concreto, possuindo estes, resistências à compressão equivalentes a 50 MPa e 30 MPa, denominados por C50 e C30, respectivamente. Os concretos utilizados foram empregados em outros trabalhos como Vidal *et al.* [21], Bandeira *et al.* [22] e Kostascki *et al.* [23].

Os materiais utilizados para o estudo e suas respectivas proporções se apresentam na Tabela 1. A brita 1 possui diâmetro característico de 19 mm e módulo de finura de 6,77 e areia com diâmetro característico de 0,6 mm e módulo de finura de 1,38. O cimento Portland utilizado foi do tipo CPV ARI. Para o traço C50 foi adicionado aditivo químico superplastificante (MC-PowerFlow, MC-BAUCHEMIE) possui uma densidade de 1,05 g/cm<sup>3</sup> e conteúdo de cloretos e álcalis inferior a 0,1 (dados fornecidos pelo fabricante).

Tabela 1 - Traços em massa dos concretos C50 e C30

Material	C50	C30
Cimento Portland CPV (kg/m <sup>3</sup> )	441,85	304,48
Areia média (kg/m <sup>3</sup> )	746,73	782,51
Brita com $d_{m\acute{a}x}=19$ mm (kg/m <sup>3</sup> )	1020,67	1062,63
Água (kg/m <sup>3</sup> )	189,99	207,04
Superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	0,33	–
Slump (mm)	110	140

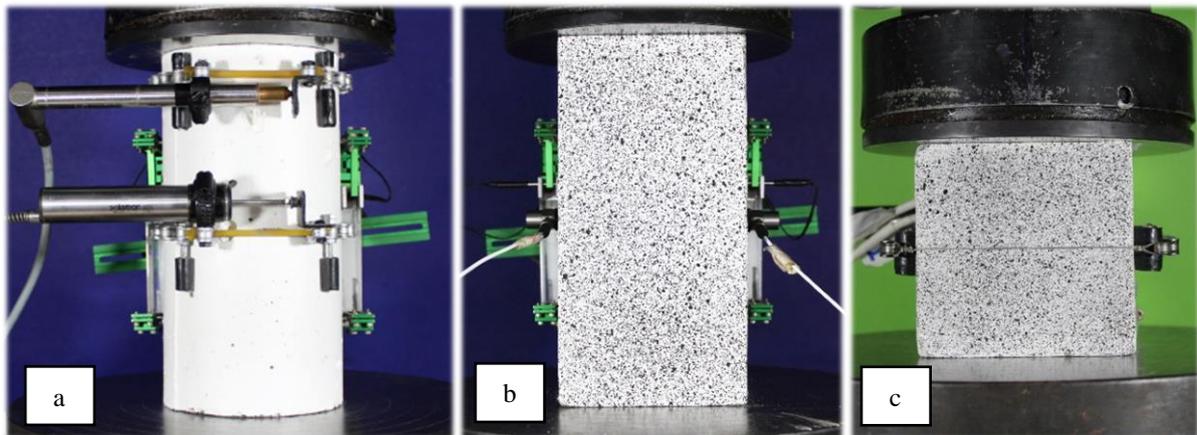
Produziram-se um total de 104 espécimes, dividindo-se entre os dois tipos de concreto analisados (C50 e C30) em três geometrias distintas: cilindros, de altura (h)=20cm e base(b)=10cm, prismas, com altura h=20cm e b=10x10cm, e cubos, com lados de 10cm.

A Figura 1 apresenta as três geometrias utilizadas para realização dos ensaios, como foram instrumentados e o ambiente de teste. Na Figura 1a se apresenta um espécime cilíndrico instrumentado. Como mostrado nesta figura, nos espécimes com formato cilíndrico foram utilizados extensômetros para medir as deformações axiais dos corpos de prova e ainda foram

desenvolvidos mecanismos para determinar a expansão lateral dos cilindros tanto no centro como próximo à extremidade. Estes mecanismos consistem em correntes acopladas de LVDT's para captação dos deslocamentos horizontais que sofrem os espécimes.

Os espécimes prismáticos instrumentados podem ser verificados pela Figura 1b, onde se observam um par de extensômetros para captação da deformação vertical. As deformações horizontais não foram medidas com os mesmos mecanismos citados anteriormente. Por este motivo a face frontal ortogonal à direção da carga foi pintada de branco e pigmentada com tinta preta para utilizar a técnica de correlação digital de imagem (DIC- Digital Image Correlation) e mapeamento de fissuras. Finalmente na Figura 1c se apresentam os espécimes de formato cúbico instrumentados com strain gauges (SG's) para captação da deformação vertical durante ensaio de compressão axial. A face frontal dos cubos também foi tratada da mesma forma que os prismas para utilização da técnica DIC.

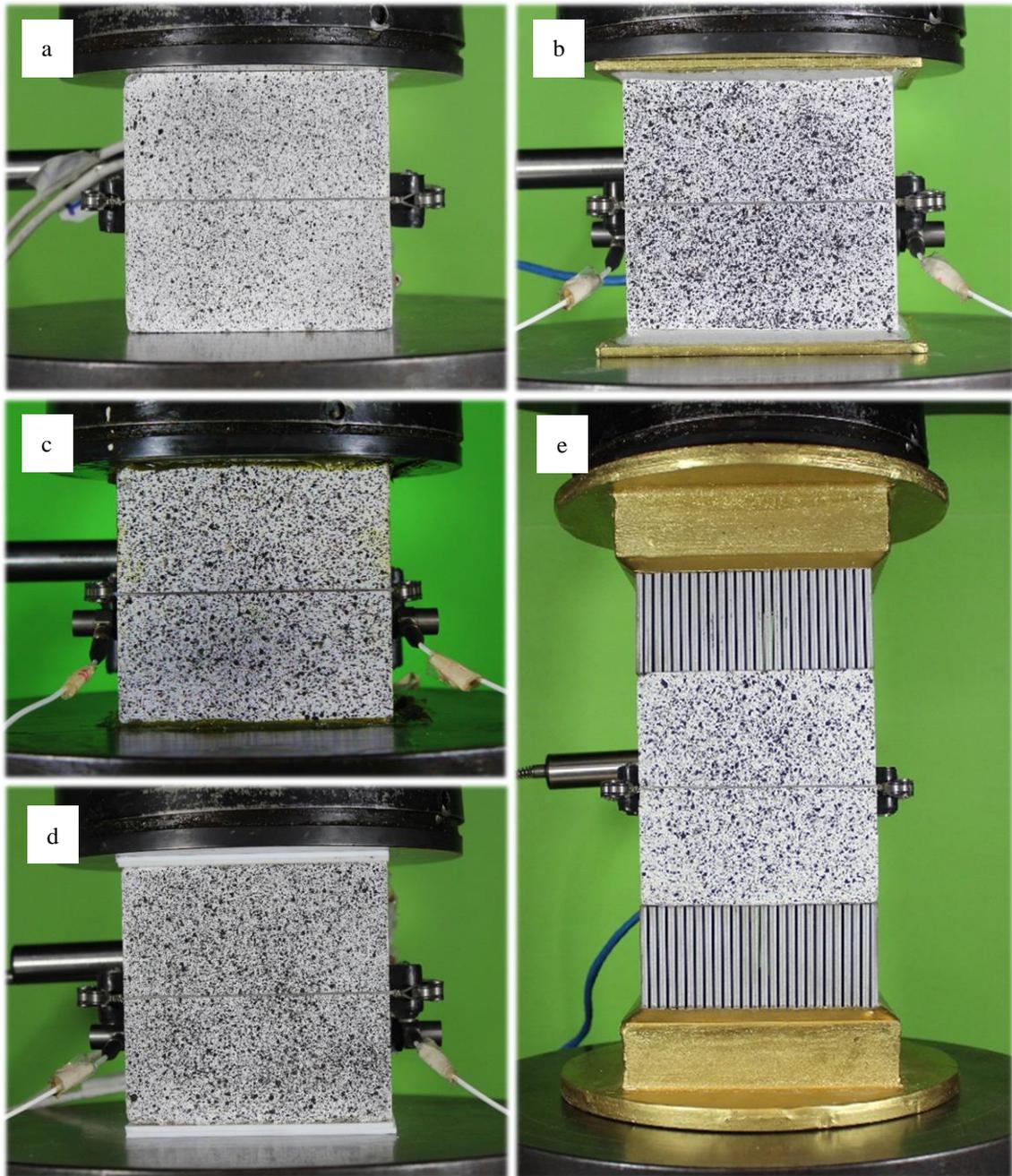
Figura 1 - Ambiente de teste e instrumentação para cada geometria de espécime: Cilindro (a), Prisma (b), Cubo (c)



Para investigar a influência da restrição no concreto, utilizaram-se 5 condições de contorno. Na Figura 2 se apresentam as condições de contorno utilizadas no presente trabalho. O ensaio de referência, espécime ensaiado com as extremidades em contato direto com os pratos da máquina de ensaio. Um ensaio de máxima fricção realizado com chapas metálicas com espessura de 3,0 mm coladas nas faces de apoio do espécime. E a utilização de três meios diferentes para reduzir a fricção entre os corpos de prova e os pratos da máquina: graxa (utilizada para rolamentos, produzida com sabão de lítio e óleo de viscosidade média, para temperaturas moderadas), uma camada de graxa aplicada direto nas faces de contato dos espécimes; teflon, onde se colocam duas lâminas de teflon com espessura de 2,0 mm de

espessura em cada face de contato do espécime; e uma placa escova desenvolvida exclusivamente para este trabalho.

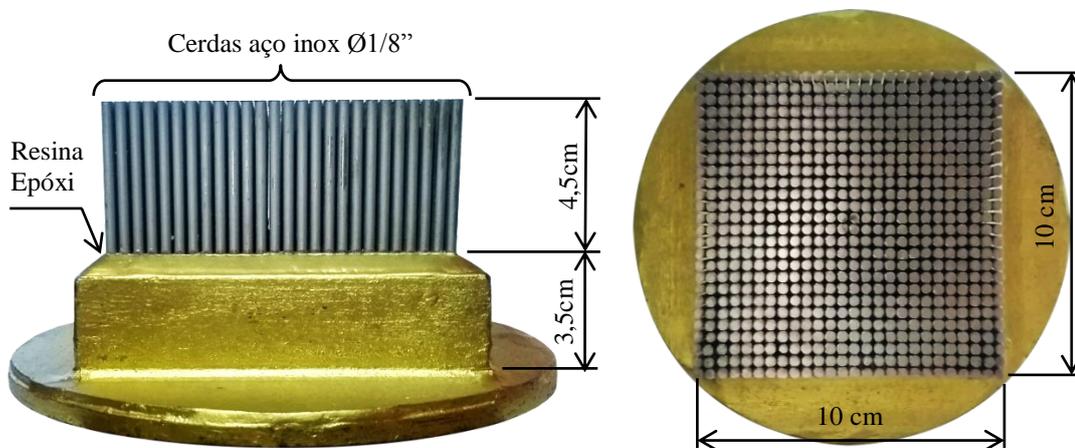
Figura 2 - Condições de contorno utilizadas: Referência (a), Chapas Coladas (b), Graxa (c), Teflon (d) e Placa Escova (e).



A placa escova mostrada na Figura 2e foi desenvolvida utilizando como referência os trabalhos de Linse [9], Schickter [10], Torrenti e Royis [11], Page e Kleeman [6], Torrenti e Djebri [12]. Este aparato tem como objetivo eliminar o efeito da fricção imposta pela restrição dos pratos da máquina de ensaio por meio de um conjunto de cerdas metálicas que aplicam o

carregamento no espécime, permitindo este se deformar transversalmente através da movimentação das cerdas. As cerdas utilizadas para a placa escova, apresentada em mais detalhes pela Figura 3, são de aço inox possuindo diâmetro de 1/8 de polegada. Devido às dimensões dos espécimes utilizados, foram desenvolvidas 676 cerdas de aço inox espaçadas por 0,4 mm, com comprimento livre de 4,5 cm. O comprimento adotado foi dimensionado com base na tensão de compressão dos concretos utilizados, de modo que durante o ensaio de compressão estas deflexionem somente no regime elástico.

Figura 3 – Placa Escova desenvolvida para o trabalho



Para realização dos ensaios de compressão axial se utilizou de uma máquina de ensaios universais da marca INSTRON, SATEC séries, modelo 5590-HVL, com capacidade máxima de 1500 kN. Os ensaios foram controlados pelo deslocamento do atuador a uma taxa de 0,05 mm/min, devido ao comportamento explosivo do concreto e para evitar danos ao equipamento. Para ambos os concretos foram executados 4 ensaios de compressão axial por condição de contorno para cada geometria adotada.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados da pesquisa separados primeiro por tipo de concreto. Desta forma, depois, se verificará se há diferença ou mudança no comportamento e nos mecanismos de falha em relação à resistência do material.

#### 3.1. Concreto C50

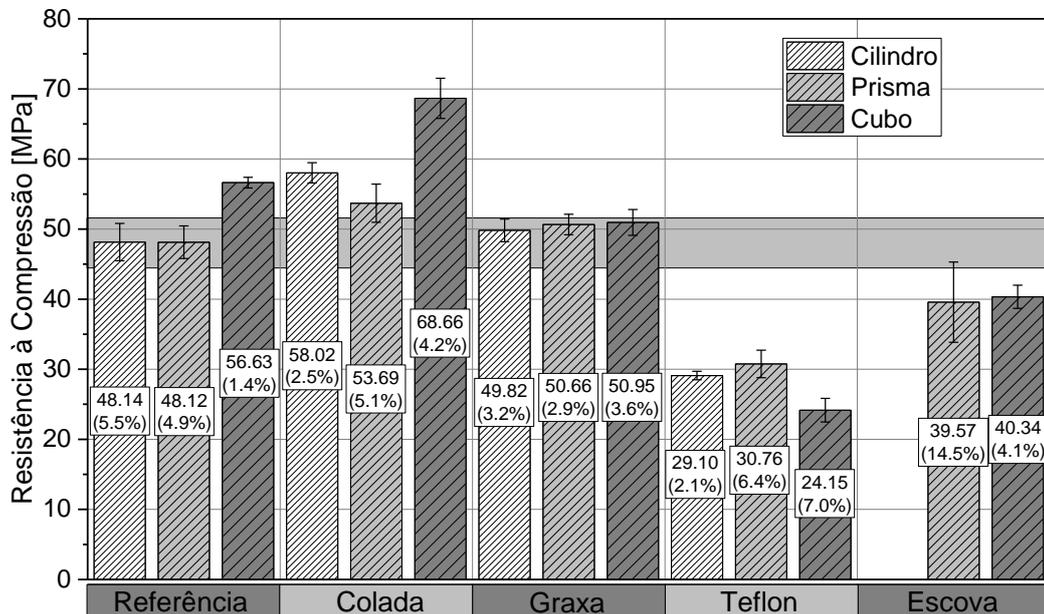
Em estudos prévios (Vidal *et al.* [21], Bandeira *et al.* [22] e Kostaski *et al.* [23].) foi verificado que as condições de contorno influenciam no comportamento mecânico do

concreto. Vidal *et al.* [2] verificou que para um concreto de 50MPa, a relação de resistência entre amostras cúbicas ensaiadas à compressão axial confinadas por chapas metálicas coladas e não confinadas com teflon nas faces de apoio, é em média de 0,35. Para Bandeira *et al.* [28] a utilização de graxa como meio antifricção reduziu em média 40% da resistência máxima encontrada para ensaios confinados com chapas coladas, isto para concretos de 30 MPa e 65 MPa. Com base nos resultados destes estudos, verificou-se a relevância das condições de contorno. Por isso realizou-se esta investigação que aprofunda o estudo das condições de contorno sob diferentes geometrias de espécime em duas resistências de concreto.

### **3.1.1. Efeito na Resistência à Compressão Axial**

Quando ensaiado o primeiro espécime cilíndrico com as placas escova como condição de contorno, uma falha explosiva ocorreu danificando as mesmas. Por este motivo não foram realizados os demais ensaios com placas escova em corpos de prova cilíndricos, descartando assim esse primeiro ensaio. Na Figura 4 se podem observar as resistências médias obtidas nos ensaios de compressão axial para o concreto C50 juntamente com desvio padrão, assim como o respectivo coeficiente de variação para cada ensaio. Nesta figura se destaca com uma sombra o limite de decisão obtido pelo método de Tukey (com 95% de confiança) dos espécimes cilíndricos de referência, assim, os grupos que se encontram dentro desta sombra não são estatisticamente diferentes dos resultados de referência.

Figura 4 - Resistência à compressão axial do concreto C50 conforme geometria e condição de contorno



Ao realizar uma análise de variâncias (anova) com um nível de significância de 95% se observou que tanto as condições de contorno, a geometria dos espécimes e também a interação entre esses dois fatores são significativos na resistência à compressão obtida. Quando se analisa a geometria dos corpos de prova se verifica que não há diferença significativa na resistência à compressão axial encontrada para espécimes cilíndricos e os prismáticos, utilizando o método de Tukey para comparação múltipla de médias [28, 29, 30]. Assim, por mais que não se tenha determinado os resultados de cilindros com placas escovas (como explicado anteriormente), não afetará muito a análise dos resultados, pois foram obtidos os resultados dos prismas com placas escova. Somente há diferença significativa entre as resistências de cubos e cilindros/prismas quando as condições de contorno são referência e coladas. Assim se verifica que os mecanismos utilizados para reduzir a restrição entre os espécimes e a máquina de ensaio eliminaram o efeito da esbeltes.

Quando se analisam somente as condições de contorno se observa que não há diferença significativa entre os espécimes de referência e quando se utiliza graxa, inclusive entre os espécimes cúbicos (onde aparentemente é maior a diferença das médias). Quando utilizadas chapas coladas todas as geometrias se mostraram significativamente mais resistentes que os ensaios referência. Para cilindros e prismas encontrou-se em média 16% mais resistência, enquanto os cubos tiveram entorno de 21% de aumento. Quando utilizadas as placas escova como condição entre os espécimes e a máquina de ensaio se observou uma

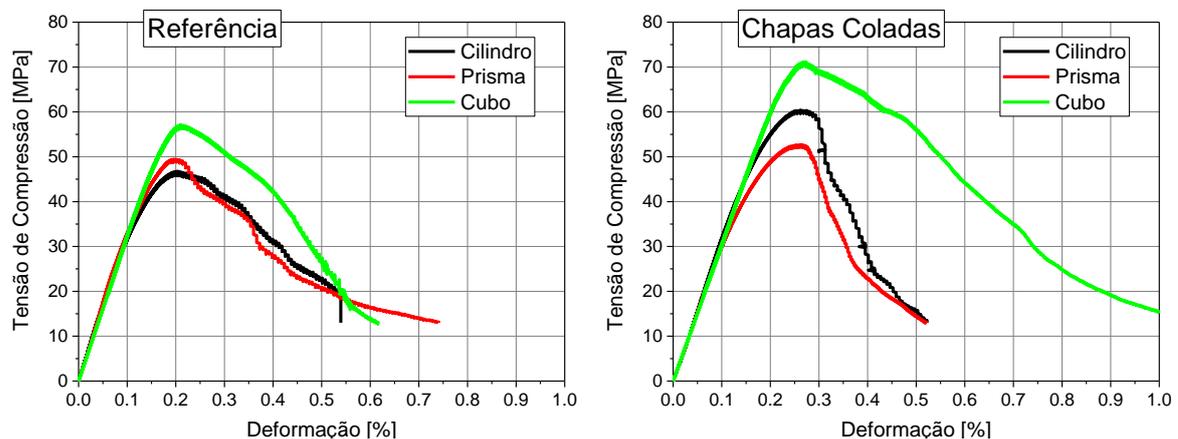
redução de 18% da resistência à compressão axial além da eliminação do efeito da geometria, como antes explicado. Finalmente se encontrou uma redução da ordem de 40% em relação à referência quando adicionadas duas placas de teflon na superfície de contato. Até neste caso se observou uma redução na resistência média (porém não significativa) quando utilizados espécimes de geometria cubica, efeito totalmente diferente do encontrado com todas as outras condições analisadas. Este último efeito está em conformidade com o que foi encontrado por van Mier *et al.* [17], que verificou que a resistência de compressão quando utilizado laminas de teflon não variava com a mudança de esbeltes dos espécimes.

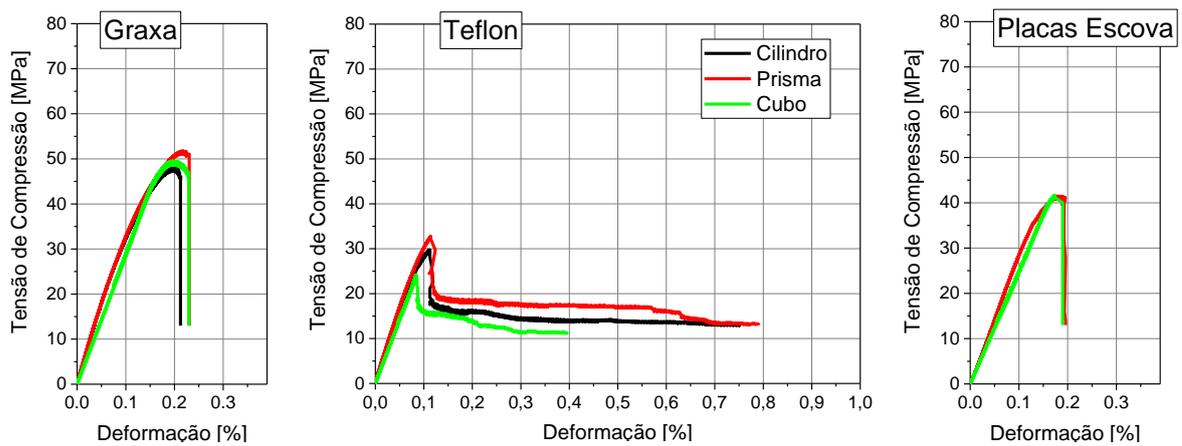
Em resumo, as condições de contorno com teflon, placa escova e graxa apresentam resultados de compressão axial independentes da geometria utilizada, porém diferentes entre si, sendo a resistência mínima media encontrada para condição de contorno com teflon, seguindo para as placas escova e finalmente com graxa (que são iguais estaticamente a referência). Os ensaios com chapas coladas para as três geometrias se demonstraram significativamente mais resistentes que os ensaios de referência. Os cubos se apresentaram mais resistentes para as condições de referência e chapas coladas em relação às outras geometrias.

### 3.1.2. Efeito no Comportamento Tensão x Deformação

Da mesma forma que as resistências à compressão axial são estatisticamente iguais para prismas e cilindros com as diferentes condições de contorno, as curvas tensão deformação apresentaram um comportamento similar entre estas geometrias. Na Figura 5 apresenta-se uma curva característica tensão x deformação para as diferentes geometrias e condições de contorno para o concreto C50.

Figura 5 – Curvas típicas tensão x deformação do programa experimental para o concreto C50





Ao analisar a Figura 5 é importante salientar que o módulo de elasticidade obtido das curvas tensão deformação não muda significativamente com a geometria e com as condições de contorno, sendo em média de 32 GPa. Porém, prismas e cilindros apresentaram uma leve ondulação quando foram utilizados mecanismos para redução da fricção (graxa, teflon ou placa escova).

Os ensaios de referência e com chapas coladas, independente da condição de contorno apresentaram elevada tenacidade, destacando-se os cubos com chapas coladas, que apresentaram não só um elevado acréscimo de resistência quando comparado às outras geometrias, como uma extensa absorção de energia até a resistência última do material.

Analisando as curvas tensão x deformação características também não se encontrou diferença entre espécimes cilíndricos e prismáticos em nenhuma das condições de contorno, o que reforça a ideia de que a geometria não altera o resultado quando utilizado um concreto C50 (com a mesma relação de aspecto,  $h/b=2$ ). Por mais que na análise do item anterior tenha sido observada que a resistência à compressão axial dos espécimes de referência e com graxa sejam estatisticamente equivalentes, o comportamento da curva tensão x deformação é diferente. As condições de contorno com graxa e placa escova demonstraram comportamentos pós-picos similares, em que após alcançar a carga máxima, o material perde a capacidade de resistir à compressão não absorvendo mais energia ao longo do ensaio. Segundo Kumar *et al.* [2] e Kotsovos [7] o comportamento apresentado por essas condições de contorno demonstram coerência se tratando de um material frágil como o concreto, visto que o amolecimento verificado nos ensaios tradicionais de compressão, segundo os autores, é resultado da fricção de contato entre amostra e os pratos da máquina de ensaio.

Nas três condições de contorno com redução de fricção, o comportamento pós-pico da curva tensão x deformação é similar independente da geometria. Isto é, a esbeltes do espécime

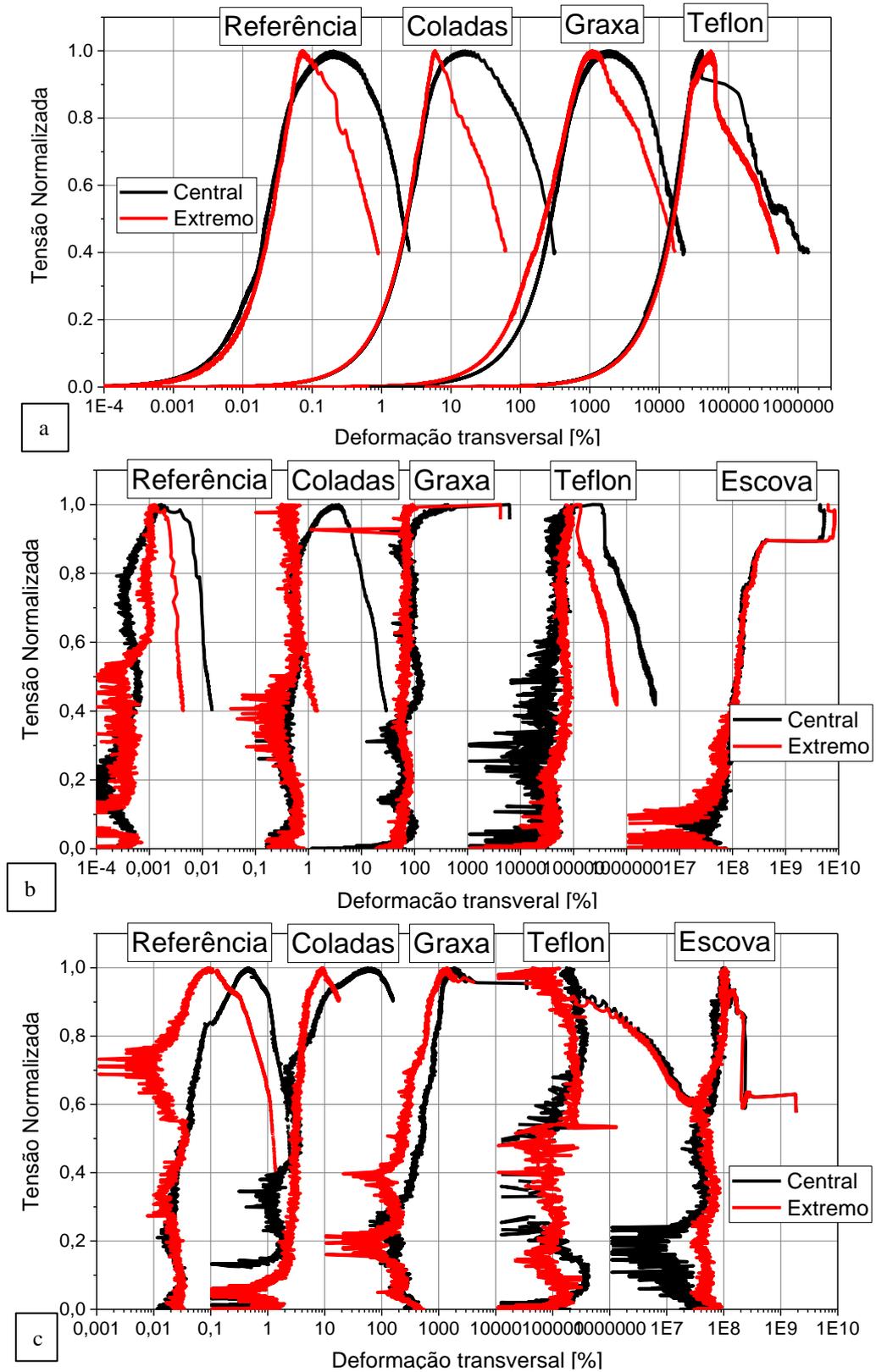
deixa de influenciar nos resultados. Pode-se verificar que para a condição de contorno com teflon, o pico de resistência é bastante íngreme, seguido de uma queda abrupta da tensão e uma longa deformação “elastoplástica” em 60% da resistência máxima. Como mostrado mais adiante, no item 3.1.4, após a ruptura, os espécimes ensaiados com essa condição de contorno, rompem com diversas fissuras verticais que acabam por se fragmentar em inúmeras colunas que acabam se subdividindo ao longo de toda essa extensa deformação.

Como resumo desta análise se pode destacar que não se observa diferença entre cilindros e prismas independentemente da condição de contorno e que nos casos de referência e chapas coladas há um aumento de tenacidade devido a alta fricção entre os espécimes e a máquina de ensaio. A condição com teflon apresenta um comportamento pós-pico distinto em relação às outras, com uma longa deformação “elastoplástica” decorrente do seu modo de fratura colunar. As condições de graxa e placa escova eliminam o amolecimento pós-pico.

### **3.1.3 Efeito das Deformações Laterais**

Os gráficos tensão x deformação para análise da deformação transversal central e de extremidade para o concreto C50 conforme geometria e condição de contorno se encontram na Figura 6 que foram obtidos nos corpos de prova cilíndrico utilizando LVDTs e correntes (como mostrando na Figura 6a). Cabe salientar que essas deformações são deformações medias diametrais que levam em consideração a deformação de todo o espécime e foram plotadas em escala logarítmica para observar melhor o comportamento das deformações pequenas antes do pico de tensões e foram deslocados para a direita as curvas para diferentes condições de contorno (para facilitar a interpretação). Nas Figura 6b e Figura 6c se apresentam os resultados obtidos por pós processamento do DIC dos espécimes prismáticos e cúbicos, respectivamente.

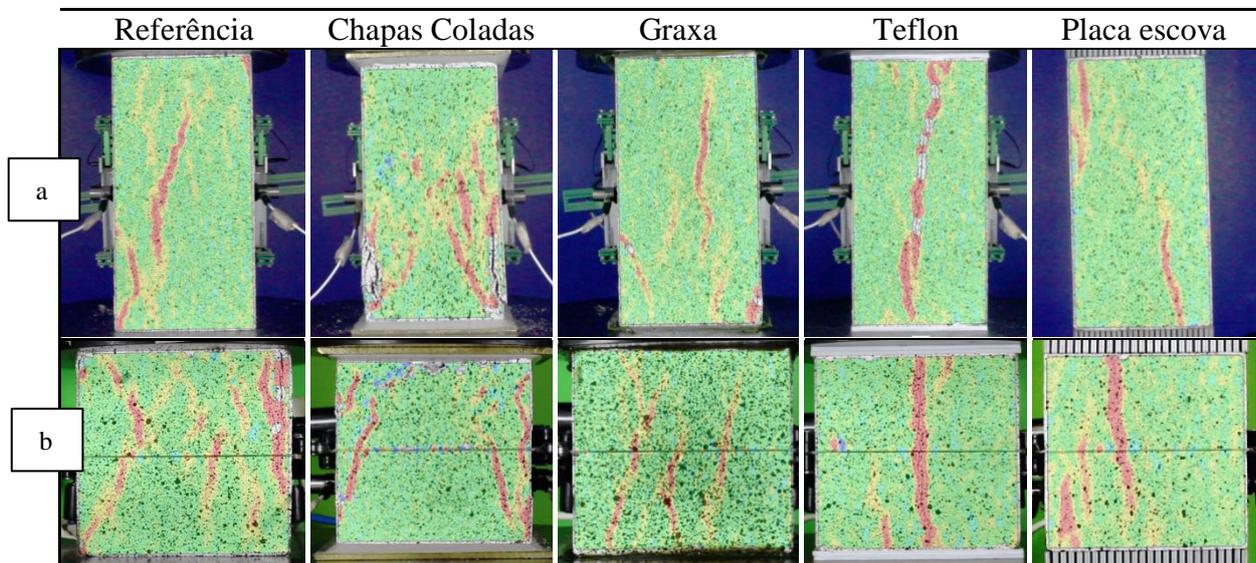
Figura 6 – Gráficos de deformação transversal (a) dos cilindros, (b) prismas e (c) cubos nas regiões do centro e de extremidade para o concreto C50.



Por mais que as medições de deslocamentos feitos com DIC não tenham boa precisão, é possível observar o comportamento do campo de deslocamentos. Assim, quando colocadas as chapas coladas sempre se tem a maior diferença entre os deslocamentos de topo e de centro (mesmo observado com LVDT nos cilindros), quando colocado teflon as deformações centrais são menores e de igual ordem que as deformações de topo e com graxa e placas escova se obtém pouca diferença entre as deformações no centro e no topo. Como estas deformações são medidas em uma face do corpo (a qual foi filmada), estas são as médias de uma linha e não as medias no volume como no caso do cilindro. Assim, por exemplo, no prisma com teflon e na placa escova se observaram fissuras verticais, as quais passam pelos pontos de medição criando grandes deslocamentos sem aumento de tensão nesses pontos.

Na Figura 7 se apresentam imagens processadas no DIC representativas para cada condição de contorno ilustrando os deslocamentos na direção horizontal, perpendicular ao carregamento. Essas imagens são antes da ruptura, porém é possível observar um mapa de fissuração.

Figura 7 – Mapa de fissuração em espécimes prismáticos (a) e cúbicos (b) para o concreto C50 pós-processamento DIC



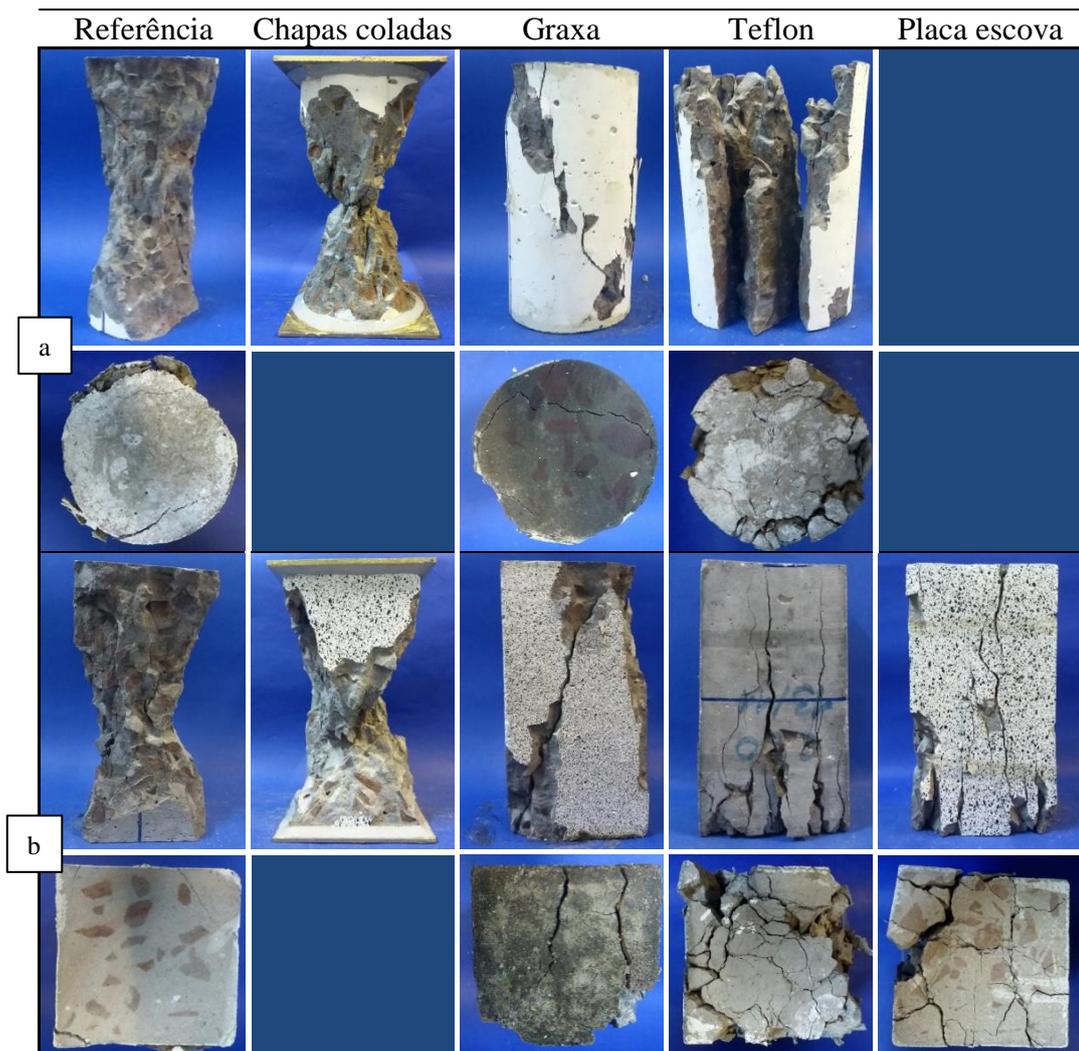
De acordo com a Figura 7, para espécimes de referência e chapas coladas para cubos e prismas, as primeiras fissuras se originam sempre próximo aos vértices se propagando em um ângulo de  $45^\circ$ . Esse processo de fissuração revela indícios da formação dos cones de tensões nas extremidades formados pelo confinamento nas faces de contato, após a ruptura estes espécimes tendem a apresentar modo de fratura bicônico em formato de ampulheta. Para as demais condições de contorno, tratando-se de condições antifricção, estas proporcionam

início de fissuras no centro do espécime em uma direção paralela a aplicação do carregamento. Esse processo de fissuração é o que se espera de ensaios uniaxiais de compressão, visto que o material está submetido em apenas uma direção de carga, conforme discutido por Mazars [20].

### 3.1.4 Efeito nas Configurações de Ruptura

Na Figura 8 se apresentam as configurações de ruptura características frontais e da face de contato para cada condição de contorno e geometria adotada.

Figura 8 - Modo de ruptura e modo de fissuração da face de contato dos espécimes do concreto C50 para cada condição de contorno e geometria: (a) cilindros, (b) prismas e (c) cubos





Para os espécimes com chapas coladas com máxima fricção que simula um engaste, observa-se claramente um formato de ruptura tronco-cônico ou ampulheta. Para espécimes de referência também se verificou a tendência de ruptura em formato tronco-cônico. Isto indica uma influência da restrição em todas as geometrias utilizadas para estas condições de contorno. Fato que coincide também com a análise das curvas tensão deformação antes apresentado, visto que o formato tronco-cônico se trata de um confinamento de tensões triaxiais que aumentam a resistência dos espécimes e proporcionam maior absorção de energia.

Com a utilização de graxa, identifica-se na face frontal uma configuração de ruptura também dominada por fissuras inclinadas, enquanto que na fase superior se encontram poucas fissuras, mas maiores e mais próximas do centro que no caso de referência. Assim o comportamento até o pico é análogo ao caso de referência devido ao processo similar de fissuração, porém no pós-pico é diferente, pois não há atrito suficiente para evitar uma propagação instável das fissuras que acarretam em uma fratura frágil e abrupta. Índícios como a resistência ser, em média, igual a dos ensaios de referência, comportamento tensão x deformação e modo de ruptura mostram que a utilização da graxa possivelmente mascare um confinamento de tensões triaxiais até alcançar a tensão máxima.

Quando utilizado teflon e placas escova a fissuração na face frontal é principalmente vertical gerando-se colunas como discutido por Bezerra [24] e Tang *et al.* [27] e na face superior se observa uma elevada fissuração distribuída na seção transversal. Este comportamento coincide com o esperado quando se trata de compressão uniaxial. Nestes casos o espécime não sofre influência dos pratos da máquina, ao alcançar a tensão máxima deixa de absorver energia e demonstra comportamento frágil como esperado de um concreto de 50MPa.

### 3.2. Concreto C30

Com o intuito de verificar se a resistência do material modifica o efeito da geometria e as condições de contorno nos resultados da compressão axial realiza-se esta análise. Como no estudo com o concreto C50 a condição de contorno com graxa não mostrou vantagem do ponto de vista das características de resistência nem na facilidade de implementação prática (sujeira excessiva), esta condição de contorno não foi analisada para este concreto.

#### 3.2.1. Resistência à Compressão Axial e Curva Tensão x Deformação do Concreto C30

Realizaram-se ensaios de compressão axial em espécimes cilíndricos, prismático e cúbicos através do concreto C30 em 4 condições de contorno: teflon, placa escova, referência e chapas metálicas coladas. Na Figura 9 se podem verificar as resistências médias obtidas nos ensaios de compressão axial para o concreto C30 juntamente com um desvio padrão, assim como o respectivo coeficiente de variação para cada ensaio. Nesta figura também se destaca com uma sombra o limite de decisão obtido pelo método de Tukey (com 95% de confiança) dos espécimes cilíndricos de referência e na Figura 10 as curvas tensão x deformação características destas configurações. O módulo de elasticidades não se alterou significativamente com a mudança da geometria e condições de contorno, sendo em média de 29 GPa.

Figura 9 - Resistência à compressão axial do concreto C30 conforme geometria e condição de contorno

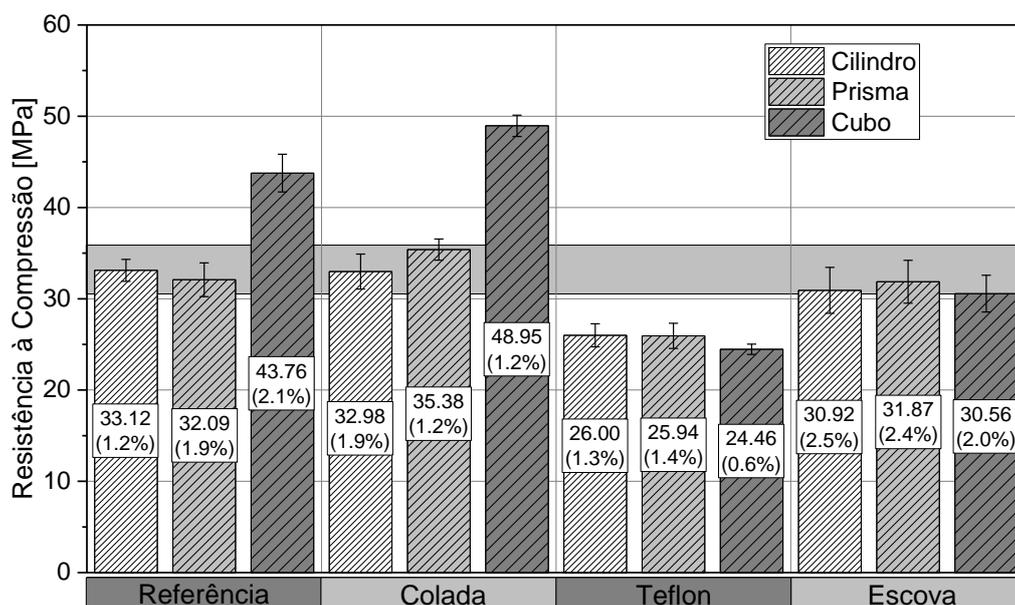
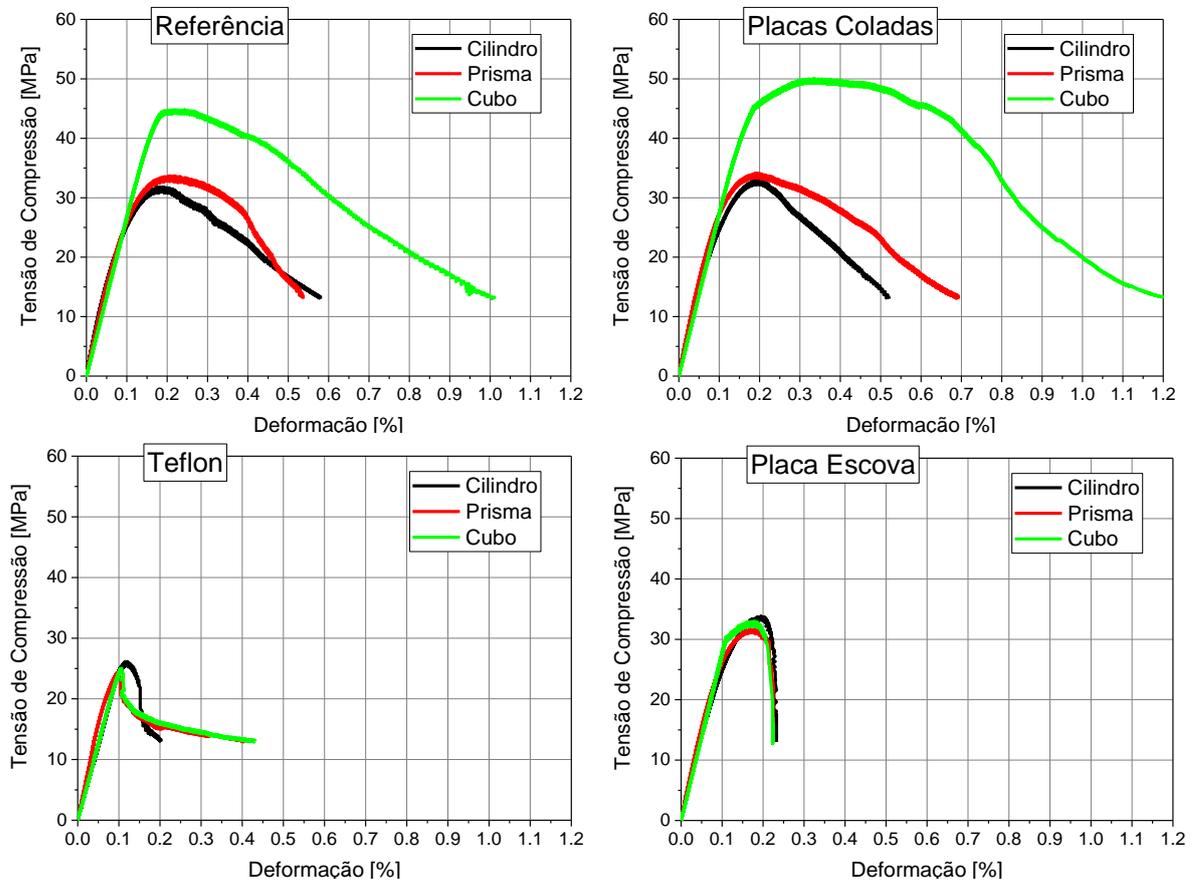


Figura 10 – Curvas típicas tensão x deformação do programa experimental para o concreto C30



Analisando estas duas figuras se pode observar que não há diferença entre os resultados entre prismas e cilindros, tanto para resistência máxima quanto para comportamento tensão x deformação. Para as condições de contorno de teflon e placa escova também não há diferença entre estes espécimes e os de geometria cúbica. Mas nas condições colada e de referência se observa um aumento de resistência e tenacidade no formato cúbico (o mesmo que para o concreto C50).

Os ensaios realizados com as condições de contorno de referência, placa escova e chapas coladas não demonstraram resistência à compressão axial significativamente diferente entre si para espécimes de  $h/b=2$ , no caso cilindros e prismas. No entanto, quando modificado a esbeltes dos espécimes utilizando cubos  $h/b=1$ , como esperado o ensaio de referência se apresenta entorno de 30% mais resistente e para chapas coladas a variação é de 50%, visto que a resistência dos cubos tende a ser maior devido à baixa esbeltes e consequentemente um volume confinado de tensões triaxiais mais representativo que espécimes de relação  $h/b=2$ .

Assim, para este concreto não se encontrou diferença significativa (com 95% de significância e utilizando o método de Tukey) entre a resistência a compressão axial de

cilindros e prismas de referência e todas as geometrias com placas escova, porém o comportamento pós-pico da curva tensão deformação sim demonstrou diferença, sendo neste último caso mais frágil.

É interessante destacar que por mais que estatisticamente sejam iguais, os corpos de formato cubico com condições de contorno teflon, foram levemente menos resistentes que os cilindros e prismas, mesma observação encontrada com o concreto C50. A resistência à compressão quando utilizado laminas de teflon não varia com a mudança de esbeltes dos espécimes. Sendo esta condição de contorno a que apresentou menor resistência à compressão axial, em média 20% menos resistentes que cilindros e prismas de referência, e uma curva tensão deformação quase frágil, porém com recuperação de deformação “elastoplastica” para tensões da ordem de 60% da tensão de pico.

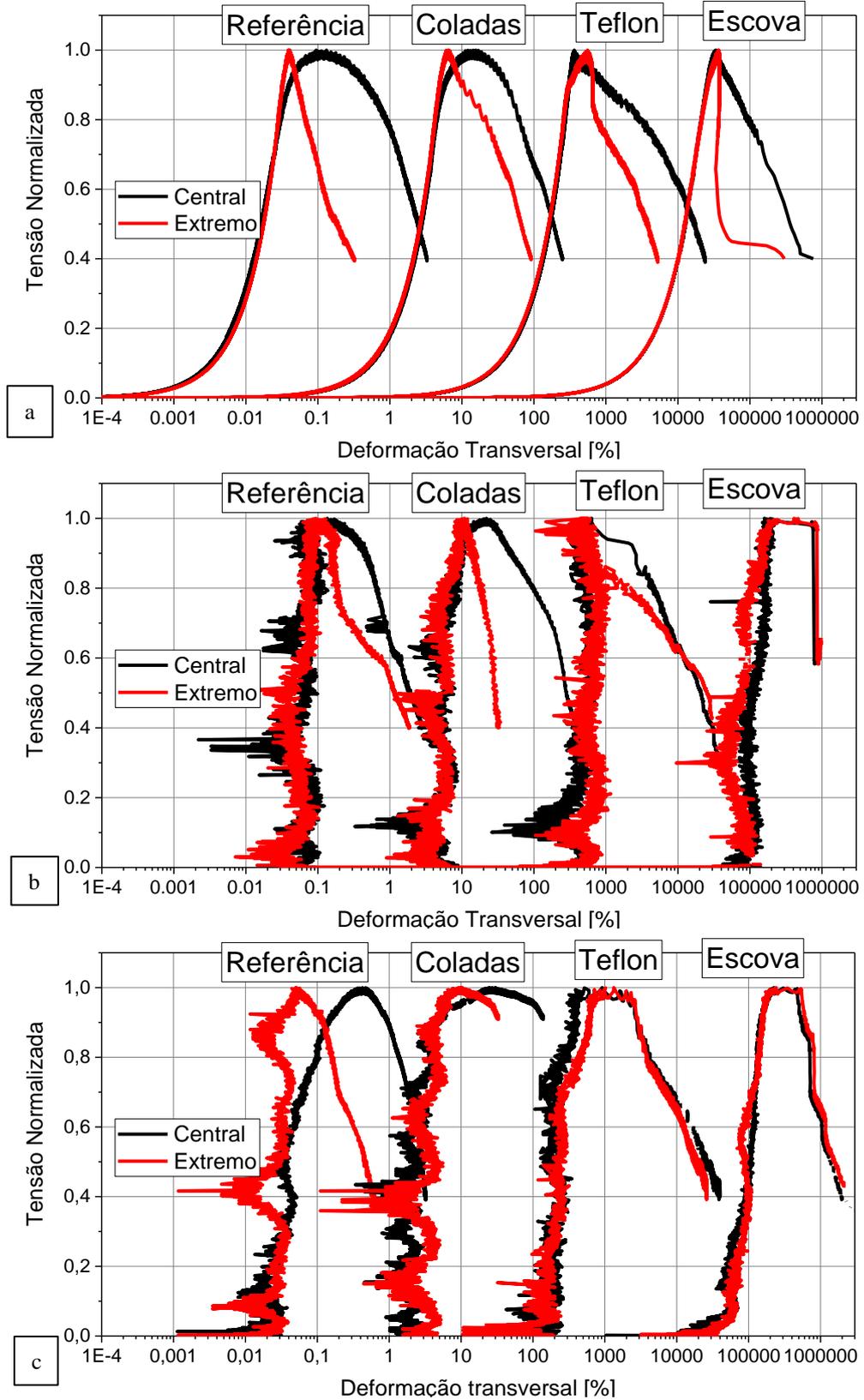
A placa escova através de suas centenas de filamentos metálicos que aplicam carga no espécime, não permitiu o material entrar em um estado de fricção, deixando-o se deformar de modo característico sem a influência do ambiente de teste. Desse modo, ao utilizar as placas escovas a resistência à compressão axial do concreto também independe da geometria que está sendo utilizada para o ensaio.

Pode-se resumir que para cilindros e prismas as condições de contorno com placa escova, referência e chapas coladas não variam os resultados significativamente em termos de resistência máxima. Ao utilizar teflon e a placa escova os resultados de compressão obtidos independem da geometria dos espécimes. Cilindros e prismas não demostram comportamento significativamente diferentes quanto à resistência à compressão sob diferentes condições de contorno e cubos demostram ser relevantemente mais resistentes devido à baixa esbeltes, tratando-se de condições de contorno de referência e chapas coladas.

### **3.2.2. Deformação Lateral e Configurações de Ruptura.**

Na Figura 11 se apresentam curvas típicas de tensão de compressão x deformação transversal medidas na extremidade e no centro dos corpos de prova de concreto C30 conforme geometria e condição de contorno. Na Figura 11a se apresentam os resultados dos corpos de prova cilíndricos obtidos mediante correntes acopladas de LVDT's. Nas Figura 11b e c se apresentam os resultados obtidos pós processamento de DIC para espécimes prismáticos e cúbicos.

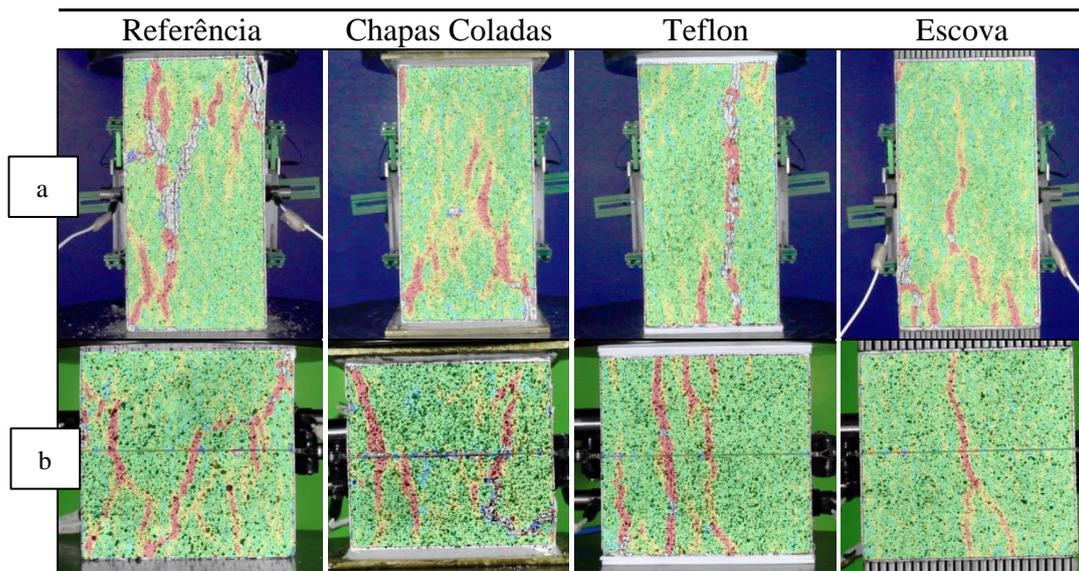
Figura 11 – Gráficos de deformação transversal (a) dos cilindros, (b) prismas e (c) cubos nas regiões do centro e de extremidade para o concreto C30.



Na Figura 11 se verifica menor diferença entre a deformação no extremo e no meio do espécime se dá para a placa escova. Quando se tem as placas coladas esta diferença pré-pico é menor que na referência. Já quando colocado teflon o efeito observado é totalmente contrário, antes do pico o extremo do corpo deforma mais que o centro do mesmo. O ideal seria que não houvesse diferença entre as deformações transversais em qualquer ponto do espécime, eliminado totalmente o confinamento, porém o que se consegue com esses meios antifricção é uma redução parcial e não total da restrição de contato.

A Figura 12 apresenta as imagens processadas no DIC representativas para cada condição de contorno ilustrando os deslocamentos na direção horizontal, perpendicular ao carregamento.

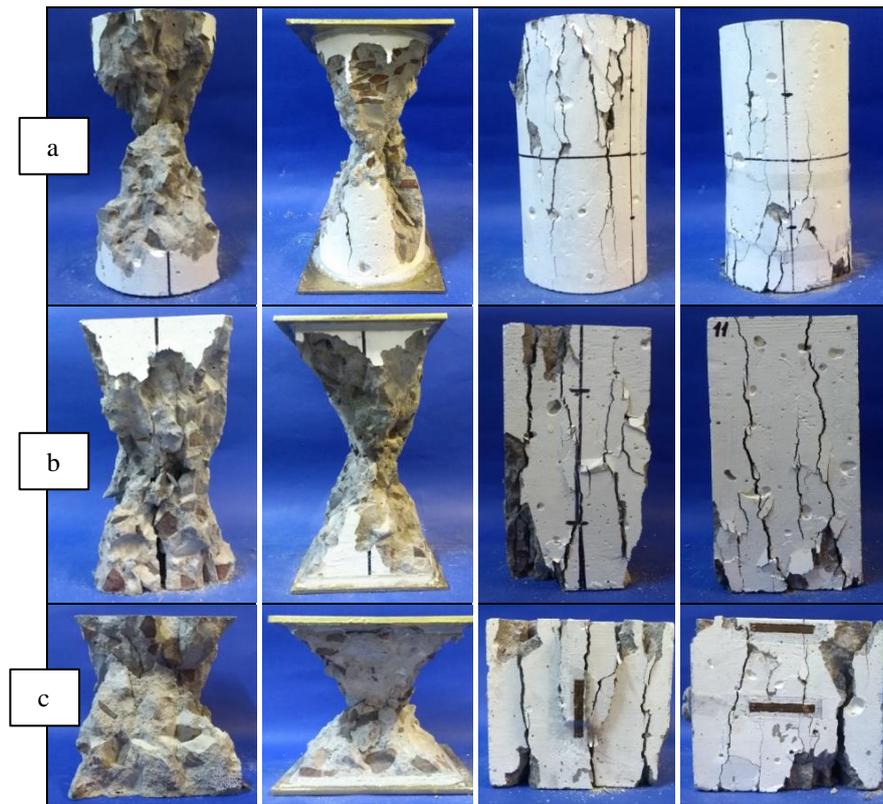
Figura 12 - Mapa de fissuração em espécimes prismáticos (a) e cúbicos (b) para o concreto C30 pós-processamento DIC



Os modos de ruptura apresentados na Figura 13 demonstraram similaridade com o que foi encontrado para o concreto C50 (ver Figura 8). Espécimes ensaiados com as condições antifricção demonstraram modos de ruptura colunares com fissuras paralelas a direção de carregamento. Para os espécimes que foram ensaiados com as condições de referência e com chapas coladas, observa-se um modo de ruptura em formato de ampulheta.

Figura 13 - Modo de ruptura dos espécimes do concreto C30 para cada condição de contorno e geometria: (a) cilindros, (b) prismas e (c) cubos

Referência	Chapas coladas	Teflon	Placas Escova
------------	----------------	--------	---------------



### 3.3. Influência da Resistência do Concreto nos Resultados de Compressão Axial

Este item do trabalho tem como foco resumir a análise dos resultados para os três fatores considerados na investigação experimental, classe de concreto, geometria do espécime e as condições de contorno de referência, chapas coladas, teflon e placa escova, visto que foram utilizadas para ambos os concretos. Para isso, realizou-se uma análise de variância de três variáveis (Three-way Anova). O resultado desta análise estatística realizada com 95 % de confiança se apresenta na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise de variância para o programa experimental

Fatores	DF	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Valor F	Valor P	Sig.
Concreto	1	3199.72	3199.72	435.50	0	1
Geometria	2	511.43	255.71	34.80	3.90E-11	1
Contorno	3	6650.47	2216.82	301.72	0	1
Concreto x Geometria	2	16.72	8.36	1.13	0.32	0
Concreto x Contorno	3	1007.43	335.81	45.70	2.22E-16	1
Geometria x Contorno	6	956.76	159.46	21.70	4.46E-14	1
Concreto x Geometria x Contorno	6	75.87	12.64	1.72	0.13	0
Modelo	23	13367.47	581.19	79.10	0	
Erro	68	499.61	7.347	0	0	

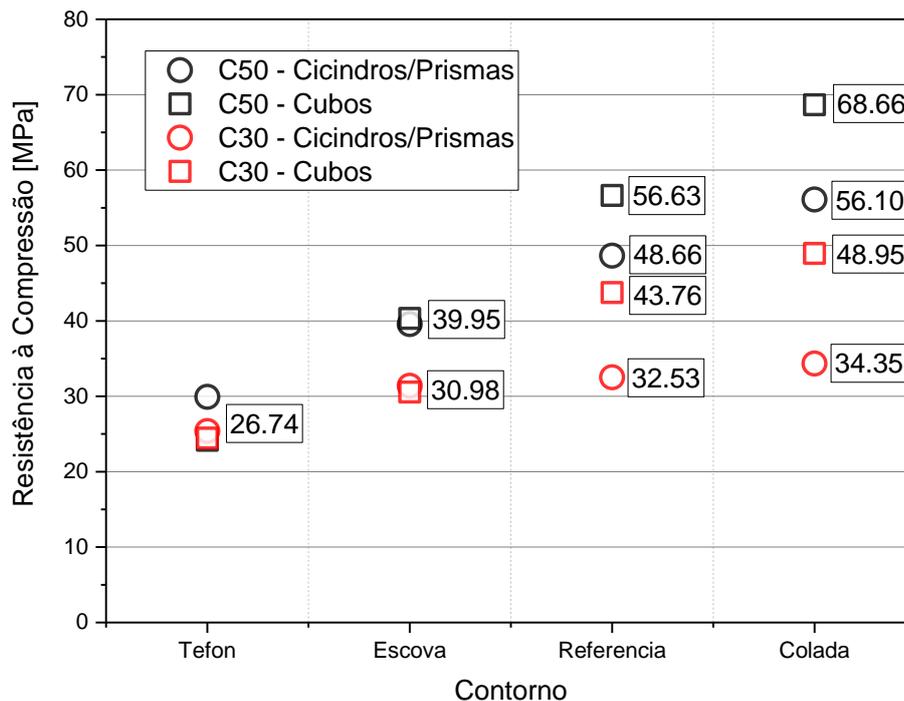
Total Corrigido	91	13867.08	0	0	0
-----------------	----	----------	---	---	---

\* Sig. igual a 1 indica com o nível de 0.05 que a população média do grupo é significativamente diferente; 0 ser não forem significativamente deferente.

Como mostrado na Tabela 2 com um nível de 0.05 de significância, os três fatores principais tem níveis significativamente diferentes, assim como são significativas suas interações, excluindo a interação entre o tipo de concreto e a geometria dos corpos de prova e a interação tripla. Isto indica que os três tipos de espécimes tem o mesmo comportamento independentemente do tipo de concreto utilizado. Fazendo uma comparação múltipla de médias com o método de Tukey, volta a ficar em evidencia que a diferença das médias não é significativa com um nível de confiança de 95%, entre os espécimes cilíndricos e prismáticos.

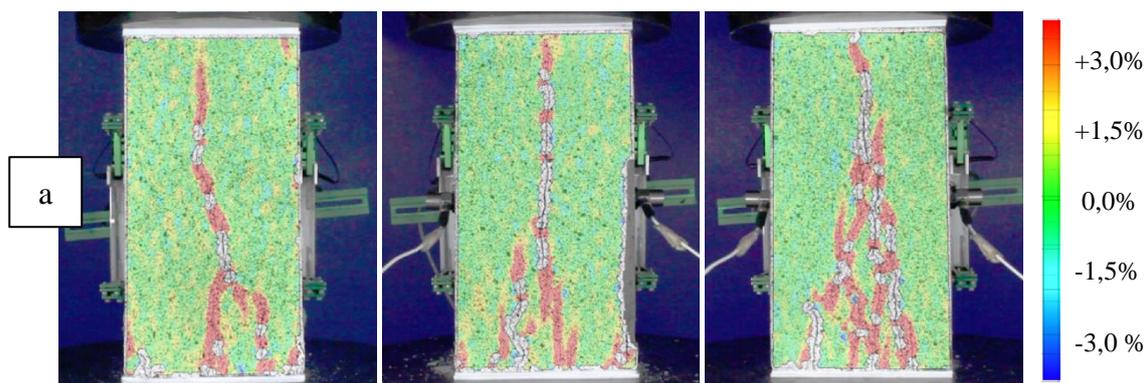
Na Figura 14 se apresentam as médias desses tres fatores comparados. Em preto são apresentadas as resistencias a compressão axial de concretos C50 enquanto que em vermelho os correspondentes aos da classe C30. Os círculos representam os resultado dos cilindros e prismas (que não diferem entre si) e com quadrados são apresentados as respostas dos cubos. Nesta figura se volta a observar a proximidade entre os resultados quando utilizado teflon, e que com as placas escova não há variação com a geometria.

Figura 14 – Comparação de médias de resistência à compressão para cada geometria e condição de contorno



Também é interessante ressaltar que não se encontrou diferença significativa entre as medias de resistência à compressão encontrada para ensaios com utilização de teflon para os dois concretos. Quando utilizado teflon os resultados independem do tipo de concreto, sendo a resistência encontrada no ensaio de compressão axial um valor limitado pelas propriedades das placas de teflon utilizadas nos ensaios. Além de que, para ensaios com teflon as deformações transversais são maiores próximo aos apoios, demonstrando uma fissuração acentuada que não denota coerência nos ensaios de compressão (Figura 15). Para esta condição de contorno ocorre uma localização de deformação nos agregados próximos aos extremos, levando a uma falha principalmente transgranular (também é observado em algumas partes da superfície de contato falha intergranular) e localizada ao invés de uma falha distribuída uniformemente pela face. Esse processo pode ser justificado pela deformação acentuada das placas de teflon em uma tensão média de 25 MPa, a qual acaba por concentrar o carregamento em alguns agregados. Uma explicação a este processo de falha é que os agregados são do mesmo tamanho e composição, a ruptura deles ocorre à mesma tensão aplicada e se obtém essa ruptura independente do tipo de concreto utilizado. Na Figura 15 se apresentam espécimes prismáticos e cilíndricos que demonstram com clareza o processo característico de concentração de fissuras em umas das faces de contato dos espécimes. Para cubos não se observar de maneira tão clara esse processo.

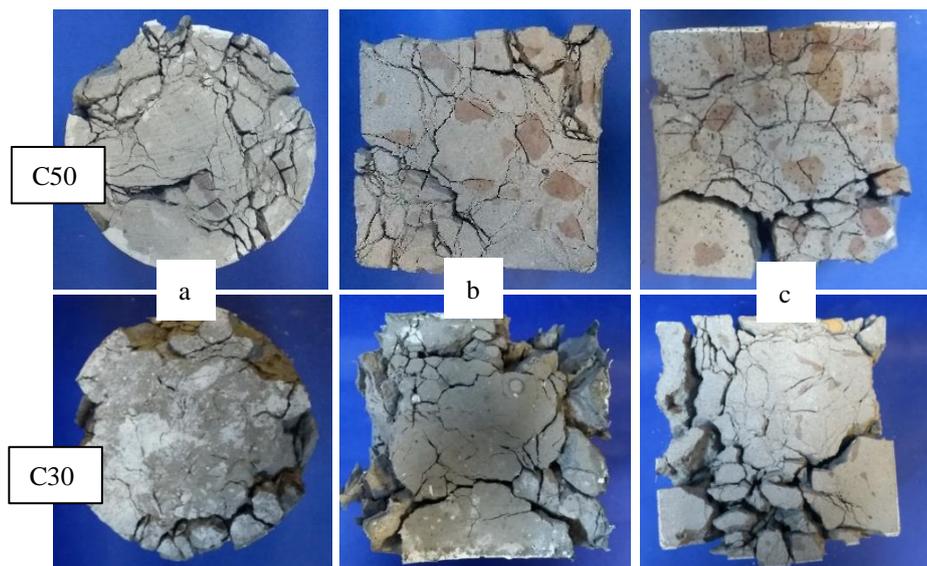
Figura 15 – Processo de fissuração característico dos espécimes com relação  $h/b=2$  ensaiados com teflon: prismas pelo método DIC (a) e cilindros (b)





Como se pode observar na Figura 15 uma das faces de contato sofre um processo de ruptura mais acentuado e através da Figura 16 se podem observar estas face de contato para alguns dos espécimes ensaiados com chapas de teflon, cabe salientar que estas figuras são representativas do comportamento observado em todos os ensaios. Uma ou ambas as faces de contato são fortemente danificadas, apresentando um padrão de falha principalmente transgranular que leva o espécime a ruptura mesmo não alcançando a tensão característica do material, sendo esta induzida possivelmente por uma deformação irregular ou pontual do próprio teflon. Isto poderia ser evitado alterando as espessuras das placas, porém é um ponto de que deve ser mais aprofundado em futuras pesquisas.

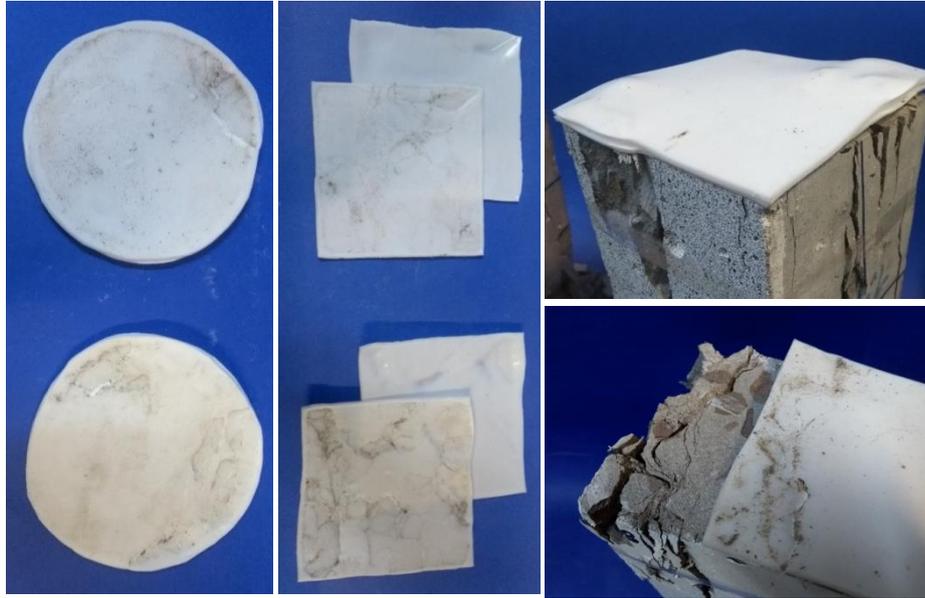
Figura 16 – Faces de contato danificadas características dos espécimes ensaiados com utilização de chapas de teflon para os concretos C50 e C30. Cilindros (a), prismas (b) e cubos (c)



Na Figura 17 se apresentam as deformações em lâminas de teflon utilizadas em espécimes cilíndricos e prismáticos após a ruptura dos espécimes, pode-se notar que a

superfície do teflon se deforma devido à punção de alguns agregados do espécime, o que induz a ruptura de maneira precipitada.

Figura 17 – Deformação das chapas de teflon utilizadas para ensaios de compressão



Conforme discutido, constata-se que a utilização de teflon forneceu resultados mecânicos possivelmente influenciados pela própria condição de contorno. Porém, ao analisar A Tabela 2 e Figura 14, pode-se chegar a algumas constatações quanto a uso de placas escova. Quando utilizadas não verificam diferença entre cubos, cilindros e prismas, independentemente do tipo de concreto. Isto significa que a utilização das placas escovas elimina o efeito da esbeltes e se obtém uma ruptura colunar, nos dois tipos de concretos analisados.

Desta forma considerando que o teflon encontra uma característica do agregado e não do concreto, a menor restrição se obtém com as placas escova. Considerando que este resultado seria a compressão axial real, sem restrição, os concreto empregados seriam na verdade classes C30 e C40 (e não C50 como antes estipulado). O concreto C30 tem um aumento máximo de 11% quando a fricção é maximizada nos espécimes mais esbeltos ( $h/b=2$ ) e 58% nos mais robustos ( $h/b=1$ ). O concreto C50 (de classe real C40 como citado anteriormente), tem um aumento máximo de 40% quando a fricção é maximizada nos espécimes mais esbeltos ( $h/b=2$ ) e 72% nos mais robustos ( $h/b=1$ ). Em ambos os casos os espécimes de referência se encontram intermediários entre esses casos extremos, ficando claro que esse estado não é de compressão uniaxial como considerado normalmente nos ensaios experimentais.

Conforme a ASTM C39 quando o espécime possui uma relação  $h/b < 1,75$ , o resultado de resistência máxima à compressão deve ser multiplicado por um fator de correção correspondente. Esses fatores são adequados para com concretos de resistência média entre 14 e 42MPa, sendo que para concretos com resistência maiores as correções podem ser mais elevados. Os fatores de correção são utilizados para espécimes de mesma forma com relações  $h/b$  diferentes, portanto, para o presente estudo é possível comparar o fator encontrado de resistência máxima entre cubos e prismas para o concreto C30 e C50. O fator de redução de resistência à compressão para espécimes de  $h/b=1,0$  segundo a ASTM C39 é de 0,87. Pela Tabela 4 pode-se verificar os fator encontrados para as diferentes condições de contorno para os dois concretos utilizados.

Tabela 4 – Fatores de correlação entre espécimes prismáticos de  $h/b=2,0$  e  $h/b=1,0$

Condições de contorno	$\frac{\sigma_{prisma(\frac{h}{b}=2,0)}}{\sigma_{cubos(\frac{h}{b}=1,0)}}$	
	C30	C50
Referência	0,73	0,84
Chapas Coladas	0,72	0,78
Graxa	-	1,00
Teflon	1,06	0,78
Placa Escova	1,04	0,98

De acordo com a Tabela 4, o concreto C30 mesmo se enquadrando na faixa de resistência para aplicação do fator de redução da norma, os cubos de referência demonstraram-se consideravelmente mais resistentes do que a norma considera, necessitando de um fator de redução ainda menor de 0,73 para compatibilizar a resistência com espécimes de  $h/b=2,0$ . O concreto C50 se aproxima mais do fator sugerido pela norma. Quando utilizadas as condições de contorno com chapas coladas a variação de resistência entre espécimes  $h/b=2,0$  e  $h/b=1,0$  foi intensificada e quando utilizados os meios anti-fricção os fatores ficaram próximos de 1,0 com exceção da utilização de teflon para o C50.

Por fim, ainda podem-se fazer algumas constatações baseadas na bibliografia quanto as condições de contorno utilizadas no presente estudo. Segundo van Mier *et al.* [17] a utilização de teflon como condição de contorno compatibiliza as resistências entre diferentes alturas de mesma geometria de espécime pra concretos de baixa e alta resistência, reduzindo de modo acentuado o amolecimento pós-pico. No entanto, os autores não constataram resistências equivalentes entre os concretos de diferentes resistências, como verificado no presente estudo, fato que reforça a necessidade de alteração das espessuras do teflon utilizado, visto que a espessura utilizada no programa experimental de [17] variou entre 50 a 1000

micrômetros. Torrenti e Royis [8], Sagong, Kim e Park [9] e Foltz, Lee e LaFave [10] utilizaram placas escova justamente pela eliminação do confinamento no material, fato verificado neste estudo. Observou-se a eliminação do amolecimento gerado pela fricção dos pratos da máquina e ainda determinou-se uma redução de resistência à compressão do concreto C50, constatando que o mesmo deve ser C40. O que condiz com o encontrado por Schickter [10], em que placas escova apresentaram resultados 20% menos resistentes, determinando a real resistência à compressão do material para concretos de classe C50. Kumar *et al.* [2] concluiu que a utilização de graxa para eliminação de amolecimento é a mais efetiva dentre as estudadas pelos autores. Todavia, constatou-se que a graxa elimina o amolecimento por ter comportamento explosivo devido um acúmulo elevado de energia por fricção até a primeira fissura. Fato que tornou a graxa, assim como a não praticidade de utilização desse material, uma condição menos interessante. Quanto aos modos de ruptura, os ensaios que possuem fricção demonstram fissuração em um ângulo de  $45^\circ$ , tendo a fratura em formato tronco-cônico. Para as condições antifricção se observou uma fissuração vertical na direção do carregamento, tendo fratura colunar, características que estão conforme Bezerra et al. [24] e Xu et al. [3].

#### 4. CONCLUSÕES

No presente trabalho se pretende encontrar qual a condição de contorno fornece um estado de compressão axial real nos ensaios experimentais, e como se comporta o material alterando a geometria dos espécimes e o tipo de concreto utilizado. As principais conclusões encontradas neste trabalho são:

- Os módulos de elasticidade encontrados para cada concreto não variaram com as alterações das condições de contorno e geometria dos espécimes.
- Não houve diferenças significativas em termos de resistência máxima, comportamento tensão x deformação e modo de ruptura entre espécimes cilíndricos e prismáticos. Com os espécimes cilíndricos é mais fácil a realização das medições de deformações transversais com o mecanismo de correntes e LVDT's acoplados, porém os espécimes prismáticos permitem utilizar correlação de imagens. Desta forma dependendo do equipamento disponível poderia se alternar a geometria sem obter diferenças significativas.
- A graxa não se mostrou como uma boa alternativa, já que não alterou a resistência a compressão axial em relação à referência, porém modifica a forma da curva tensão x

deformação. Ainda assim, o mecanismo de falha também muda em relação à referência, passando de uma falha mais próxima de tronco cone para uma mais próxima da colunar.

- A utilização de duas placas de teflon de 2mm de espessura também não se mostrou vantajosa, pois a tensão de ruptura de dois tipos de concreto diferente deram o mesmo valor, fazendo acreditar que com esta interface se está localizando e concentrando o dano nos agregados próximos dos apoios encontrando assim uma resistência que caracteriza os agregados e não a mistura. Ainda assim a colocação de uma placa de teflon é de fácil aplicação no momento dos ensaios, motivo pelo qual não pode ser abandonada esta opção, sendo necessários mais estudos para ver alternativas, como modificar as espessuras, quantidades de placas, ou até a utilização de filmes de teflon.

- A placa escova se mostrou interessante para determinação da resistência à compressão axial dos espécimes. A placa compatibilizou tanto a resistência máxima como o comportamento tensão x deformação para as diferentes geometrias de espécimes, assim como eliminou o amolecimento pós-pico proveniente da restrição dos pratos de aço da máquina de ensaio.

- Quando comparado o efeito da restrição entre placa escova, referência e chapas coladas, se observa que a falha condisse com a teoria sendo a restrição mínima com placa escova, o máximo com chapas coladas e uma fricção intermediária para os espécimes de referência. Tanto as curvas tensão x deformação quanto as tensões máximas e as configurações de ruptura dos espécimes de referência mostraram um comportamento intermediário entre os extremos encontrados.

- Por fim, caso não seja utilizado nenhuma condição de contorno como meio antifricção entre os pratos da máquina de ensaio e as faces de apoio dos espécimes, as propriedades determinadas em ensaios de compressão axial estarão comprometidas. A resistência do espécime pode ser consideravelmente aumentada de acordo com a restrição dos pratos da máquina, principalmente para espécimes com  $h/b=1,0$ . O comportamento mecânico pós-pico é afetado, denotando elevada absorção de energia e ductilidade para materiais frágeis como o concreto e o modo de ruptura é visivelmente modificado.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem o apoio da CNPq, CAPES e FAPERGS pelo apoio que sempre estão fornecendo para a pesquisa que realizamos.

## REFERÊNCIAS

- [1] PARK, R.; PAULAY, T. **Reinforced Concrete Structures**, Wiley Interscience Publication, 1974.
- [2] KUMAR, S.; MUKHOPADHYAY, T.; WASEEM, S.A. *et al.* **Effect of Platen Restraint on Stress–Strain Behavior of Concrete Under Uniaxial Compression: a Comparative Study**. *Strength of Materials*, v. 48, n. 4, p. 592-602, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11223-016-9802-z>.
- [3] XU, Y. H.; CAI M.; ZHANG X. W.; FENG X.T. **Influence of end effect on rock strength in true triaxial compression test**. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 54, n. 6, p. 862-880, 2017. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0393>.
- [4] SCHICKTER, G. **On the Influence of Differential Load Application Techniques on the Lateral Strain and Fracture of Concrete Specimens**. In: ICF3, Munich (Germany) 1973.
- [5] VAN GEEL, E. **Concrete Behaviour in Multiaxial Compression: Experiment al Research**. 1998. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade de Arquitetura da Universidade de Tecnologia de Eindhoven, Departamento de Design Estrutural, Eindhoven, 1998.
- [6] PAGE, A. W.; KLEEMAN, P. W. **Influence of Capping Material and Platen Restraint on the Failure of Hollow Masonry Units and Prisms**. *Brick and Block Masonry*, v. 1, p. 662-670, 1991.
- [7] KOTSOVOS, M. D. **Effect of testing techniques on the post-ultimate behaviour of concrete in compression**. *Materiaux et construction*, v. 16, n. 1, p. 3-12, 1983. <https://doi.org/10.1007/BF02474861>.
- [8] TORRENTI, J. M.; ROYIS, P. **Etude numérique du dimensionnement d'un appui anti-fretage pour le béton**. *Materials and Structures*, v.22, n.2, p.149-158, 1989. <https://doi.org/10.1007/BF02472287>.
- [9] SAGONG, M.; KIM, S.; PARK, D. **Development of a loading platen containing a cylindrical roller bearing to reduce frictional constraint at the boundary**. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, n.59, p.97-104,2013.<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.12.014>.
- [10] FOLTZ, R. R.; LEE, D. H.; LAFAVE, J. M. **Biaxial behavior of high-performance fiber-reinforced cementitious composite plates**. *Construction and Building Materials*, v. 143, p. 501-514, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.167>.
- [11] BRESLER, B.; PISTER, K. S. **Strength of concrete under combined stresses**. *Journal Proceedings*. p. 321-345. 1958.
- [12] IYENGAR, K. T.; CHANDRASHEKHARA, K.; KRISHNASWAMY, K. T. **Strength of concrete under biaxial compression**. *Am Concrete Inst Journal & Proceedings*, 1965.
- [13] ERDEI, C. K. **Finite element analysis and tests with a new load-transmitting medium to measure compressive strength of brittle materials**. *Matériaux et Construction*, v. 13, n. 2, p. 83-90, 1980. <https://doi.org/10.1007/BF02473804>.
- [14] BARBOSA, Claudius de Sousa. **Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto e suas correlações com as propriedades mecânicas do material constituinte**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

- [15] CHRISTIANSEN, P.; MARTINS, P. A. F.; BAY, N. **Friction compensation in the upsetting of cylindrical test specimens**. *Experimental Mechanics*, v. 56, n. 7, p. 1271-1279, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11340-016-0164-z>.
- [16] KUPFER, H.; HILSDORF, H. K.; RUSCH, H. **Behavior of concrete under biaxial stresses**. In: *Journal Proceedings*. p. 656-666, 1969.
- [17] VAN MIER, J. G. M. *et al.* **Strain-softening of concrete in uniaxial compression**. *Materials and Structures*, v. 30, n. 4, p. 195-209, 1997. <https://doi.org/10.1007/BF02486177>.
- [18] LEE, S.; SONG, Y.; HAN, S. Biaxial behavior of plain concrete of nuclear containment building. **Nuclear Engineering and Design**, v. 227, n. 2, p. 143-153, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2003.09.001>.
- [19] CARPINTERI, A.; CIOLA, F.; PUGNO, N. **Boundary element method for the strain-softening response of quasi-brittle materials in compression**. *Computers & Structures*, v. 79, n. 4, p. 389-401, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(00\)00149-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(00)00149-8).
- [20] MAZARS, J. **Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure**. THESE DE DOCTEUR ES SCIENCES PRESENTÉE A L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE-PARIS 6, 1984.
- [21] VIDAL C.D.M.; BANDEIRA M. V. V.; LA TORRE K. R.; KOSTESKI L. E. MARANGON E. **Numerical and experimental evaluation of the anisotropic behavior and boundary condition of a structural concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 260, p. 119858, 2020.2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119858>.
- [22] BANDEIRA M. V. V. **Resistência à compressão axial do concreto com diferentes direções de carregamento e condições de contorno**. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 1, 2020. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0896>.
- [23] KOSTESKI, L. E., MARANGON, E., RIERA, J. D., DOS SANTOS, F. J., & BANDEIRA, M. V. **Assessment of concrete anisotropy in relation to the direction of casting**. *Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural*, 15(2). 2018. <https://doi.org/10.5335/rsae.v15i2.7852>.
- [24] BEZERRA, U. T. *et al.* **Corpo de prova na forma de ampulheta: resistência à compressão de concretos e argamassas (análises numérica e experimental)**. *Revista IBRACON de estruturas e materiais*, v. 9, n. 4, p. 510-524, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952016000400003>.
- [25] PAN, P.; FENG, X.; HUDSON, J. A. **Study of failure and scale effects in rocks under uniaxial compression using 3D cellular automata**. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 46, n. 4, p. 674-685, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.11.001>.
- [26] LIANG, C. Y. *et al.* **The effect of specimen shape and strain rate on uniaxial compressive behavior of rock material**. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 75, n. 4, p. 1669-1681, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0811-0>.
- [27] TANG, C. A. *et al.* **Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression—part I: effect of heterogeneity**. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 37, n. 4, p. 555-569, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(99\)00121-5](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(99)00121-5).

- [28] MILLIKEN G. A.; JOHNSON D. E. Analysis of Messy Data. Volume I: Designed Experiments. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC Press, 1992.
- [29] NETER J., KUTNER M. H., NACHTSHEIM C. J., Wasserman. W. 4th ed. Applied Linear Statistical Models. Irwin Press, 1996.
- [30] HOCHBERG, Y., TAMHANE A. C. Multiple Comparison Procedures. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1987.

## 5. CONSIDRAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou determinar dentre diferentes condições de contorno, a que proporciona um ensaio de compressão axial sem interferência dos pratos da máquina de ensaio. Testaram-se diferentes geometrias de espécime e duas resistências de concreto. As principais considerações estão listadas a seguir:

- Os módulos de elasticidade encontrados para cada concreto não variaram com as alterações das condições de contorno e geometria dos espécimes.
- Não houve diferenças significativas em termos de resistência máxima, comportamento tensão x deformação e modo de ruptura entre espécimes cilíndricos e prismáticos. Quando utilizados espécimes cilíndricos o modo de aquisição de dados referente as deformações transversais foi mais satisfatório, utilizando correntes acopladas com LVDT's. Para espécimes prismáticos foi utilizado correlação de imagem para as deformações transversais, a qual não proporciona a mesma precisão que os LVDT's, mas permite traçar um mapa de deformações em uma das faces do espécime. Portanto, dependendo do equipamento se pode alternar entre as geometrias sem diferenças quanto a comportamento mecânico do material.
- A condição com graxa utilizada para o concreto C50 não se demonstrou uma boa alternativa devido a sujeira gerada nos equipamentos de medição, além de proporcionar aos espécimes um comportamento explosivo após alcançar tensão máxima. A resistência do espécime não foi alterada quando comparado aos ensaios de referência, porém devido ao comportamento explosivo o amolecimento pós-pico foi eliminado, pois não há atrito suficiente para evitar uma propagação instável das fissuras que acarretam em uma fratura frágil e abrupta. Os resultados mostram que a utilização da graxa possivelmente mascare um confinamento de tensões triaxiais até alcançar a tensão máxima.
- A utilização de duas placas de teflon de 2,0 mm não forneceu resultados coerentes, visto que para ambos os concretos utilizados os resultados de tensão média com teflon foram próximos, o que denota que os resultados foram limitados pela condição de contorno. Supõe-se que as chapas de teflon se deformam pontualmente, localizando e concentrando danos nos agregados próximos dos apoios, propiciando assim uma resistência que não caracteriza o material.

- A placa escova se mostrou interessante para determinação da resistência à compressão axial dos espécimes. A placa compatibilizou tanto a resistência máxima como o comportamento tensão x deformação para as diferentes geometrias de espécimes, assim como eliminou o amolecimento pós-pico proveniente da restrição dos pratos de aço da máquina de ensaio. Para o concreto C50 ainda verificou uma resistência 20% menor que a observada em ensaios de referência, revelando que para concretos dessa classe, o confinamento durante o ensaio pode aumentar consideravelmente a resistência do concreto. O concreto utilizado como C50, deveria ser classe C40 como mostra os resultados obtidos com a utilização da placa escova.
- Quando comparado o efeito da restrição entre placa escova, referência e chapas coladas se observa que a falha condisse com a teoria, sendo a restrição mínima com placa escova, restrição máxima com chapas coladas e uma fricção intermediária para os espécimes de referência. Tanto as curvas tensão deformação quanto as tensões máximas e as configurações de ruptura dos espécimes de referência mostraram um comportamento intermediário entre os dos extremos encontrados.
- Por fim, caso não seja utilizado nenhuma condição de contorno como meio antifricção entre os pratos da máquina de ensaio e as faces de apoio dos espécimes, as propriedades determinadas em ensaios de compressão axial estarão comprometidas. A resistência do espécime pode ser consideravelmente aumentada de acordo com a restrição imposta pelos pratos da máquina, principalmente para espécimes com  $h/b=1$ . O comportamento mecânico pós-pico também é afetado, denotando elevada absorção de energia e ductilidade para materiais frágeis como o concreto e o modo de ruptura é visivelmente alterado.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da análise de resultados realizada no presente trabalho, fazem-se as seguintes sugestões para o desenvolvimento de futuros trabalhos:

- Para a condição de contorno com teflon, sugere-se que se façam mais ensaios com espessuras menores de teflon. A utilização de pequenas espessuras pode eliminar o efeito de deformações pontuais no material ensaiado.
- A utilização de SG's se provou ineficaz para captação da deformação lateral dos espécimes cúbicos, portanto se faz necessário o desenvolvimento de algum aparato que permita acoplar um clipe-gage ou até mesmo LVDT's que possuem ótima precisão e não são prejudicados pelo processo de fissuração externo.
- Realizar ensaios com a condição de contorno de neoprene (borracha) para concretos de baixa resistência. É habitual que sejam utilizados em ensaios de compressão para dispensar o capeamento das faces. Dependendo das propriedades da condição de interface pode prejudicar ou viabilizar um estado uniaxial de tensão no ensaio de compressão.
- Realizar ensaios com relações  $h/b$  ainda menores que as verificadas no presente trabalho. Analisar se as condições de contorno como a placa escova, ainda possuem a capacidade de compatibilização de resistência mesmo para elementos de baixa esbeltez.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C39**: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. 2015.

BANDEIRA, M. V. V., ZYDECK, R. C., KOSTESKI, L. E., & MARANGON, E. Resistência à compressão axial do concreto com diferentes direções de carregamento e condições de contorno. **Revista Matéria** (Rio de Janeiro), v25, n.1, 2020.

BARBOSA, Claudius de Sousa. **Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto e suas correlações com as propriedades mecânicas do material constituinte**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BAŽANT, Z. P. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal. **Journal of engineering mechanics**, v. 110, n. 4, p. 518-535, 1984.

BEZERRA, U. T. et al. Corpo de prova na forma de ampulheta: resistência à compressão de concretos e argamassas (análises numérica e experimental). **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, v. 9, n. 4, p. 510-524, 2016.

BUYUKOZTURK, O.; NILSON, A. H.; SLATE, F. O. **Deformation and fracture of paritulate composite**. J. Eng. Mech., ASCE, v. 98, n. EM3, 1972.

CARPINTERI, A.; CIOLA, F.; PUGNO, N. Boundary element method for the strain-softening response of quasi-brittle materials in compression. **Computers & Structures**, v. 79, n. 4, p. 389-401, 2001.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118: 2014. **Ciência Moderna**, 2014.

CHRISTIANSEN, P.; MARTINS, P. A. F.; BAY, N. Friction compensation in the upsetting of cylindrical test specimens. **Experimental Mechanics**, v. 56, n. 7, p. 1271-1279, 2016.

CHOI, S.; THIENEL, K. C.; SHAH, S. P. Strain softening of concrete in compression under. **Magazine of Concrete Research**, v. 48, n. 175, p. 103-115, 1996

DEL VISO, J. R.; CARMONA, J. R.; RUIZ, G. Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 3, p. 386-395, 2008.

DEHESTANI, M.; NIKBIN, I. M.; ASADOLLAHI, S. Effects of specimen shape and size on the compressive strength of self-consolidating concrete (SCC). **Construction and building materials**, v. 66, p. 685-691, 2014.

ERDEI, C. K. Finite element analysis and tests with a new load-transmitting medium to measure compressive strength of brittle materials. **Matériaux et Construction**, v. 13, n. 2, p. 83-90, 1980.

FOLTZ, R. R.; LEE, D. H.; LAFAVE, J. M. Biaxial behavior of high-performance fiber-reinforced cementitious composite plates. **Construction and Building Materials**, v. 143, p. 501-514, 2017

GAO, M. et al. End and shape effects of brittle rock under uniaxial compression. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, n. 20, p. 614, 2018.

HAMAD, A. J. Size and shape effect of specimen on the compressive strength of HPLWFC reinforced with glass fibres. **Journal of King Saud University-Engineering Sciences**, v. 29, n. 4, p. 373-380, 2017.

HAMPEL, T. et al. High-performance concrete under biaxial and triaxial loads. **Journal of engineering mechanics**, v. 135, n. 11, p. 1274-1280, 2009.

HUGHES, B. P.; BAHRAMIAN, B. Cube tests and the uniaxial compressive strength of concrete. **Magazine of concrete research**, v. 17, n. 53, p. 177-182, 1965.

INDELICATO, F.; PAGGI, M. Specimen shape and the problem of contact in the assessment of concrete compressive strength. **Materials and Structures**, v. 41, n. 2, p. 431, 2008.

KOSTESKI, L.E.; MARANGON, E.; RIERA J.D.; SANTOS, F.J.K.; BANDEIRA, M.V.V. Assessment of concrete anisotropy in relation to the direction of casting, **Revista sulamericana de engenharia estrutural** (online) 15 (2018) 37–45.

KOTSOVOS, M. D. Effect of testing techniques on the post-ultimate behaviour of concrete in compression. **Materiaux et construction**, v. 16, n. 1, p. 3-12, 1983.

KUMAR, S. et al. Effect of Platen Restraint on Stress–Strain Behavior of Concrete Under Uniaxial Compression: a Comparative Study. **Strength of Materials**, v. 48, n. 4, p. 592-602, 2016.

KUPFER, H.; HILSDORF, H. K.; RUSCH, H. Behavior of concrete under biaxial stresses. **In: Journal Proceedings**. p. 656-666, 1969.

LEE, S.; SONG, Y.; HAN, S. Biaxial behavior of plain concrete of nuclear containment building. **Nuclear Engineering and Design**, v. 227, n. 2, p. 143-153, 2004.

LI, M. et al. Specimen shape and size effects on the concrete compressive strength under static and dynamic tests. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 84-93, 2018.

LIANG, C. Y. et al. The effect of specimen shape and strain rate on uniaxial compressive behavior of rock material. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 75, n. 4, p. 1669-1681, 2016.

LINSE, D. Versuchsanlage zur Ermittlung der dreiachsigen Festigkeit von Beton mit ersten Versuchsergebnissen. **Cement and Concrete Research**, v. 3, n. 4, p. 445-457, 1973.

MAZARS, J. **Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure**. THESE DE DOCTEUR ES SCIENCES PRESENTÉE A L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE-PARIS 6, 1984.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3<sup>o</sup> ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto-IBRACON, 2008.

MIER, V. Multi-axial Strain-Softening of Concrete, Part I: Fracture, **Materials and Structures**. RILEM, v. 19, p. 111, 1986.

MUCIACCIA, G.; ROSATI, G.; DI LUZIO, G. Compressive failure and size effect in plain concrete cylindrical specimens. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 185-194, 2017.

PAN, P.; FENG, X.; HUDSON, J. A. Study of failure and scale effects in rocks under uniaxial compression using 3D cellular automata. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 46, n. 4, p. 674-685, 2009.

PAGE, A. W.; KLEEMAN, P. W. Influence of Capping Material and Platen Restraint on the Failure of Hollow Masonry Units and Prisms. **Brick and Block Masonry**, v. 1, p. 662-670, 1991.

PIVONKA, P.; LACKNER, R.; MANG, H. A. Shapes of loading surfaces of concrete models and their influence on the peak load and failure mode in structural analyses. **International journal of engineering science**, v. 41, n. 13-14, p. 1649-1665, 2003.

PITUBA, J. J. C. **Sobre a formulação de um modelo de dano para o concreto**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PROENÇA, S. P. B. **Sobre modelos matemáticos do comportamento não-linear do concreto: análise crítica e contribuições**. 1988. Tese de Doutorado, EESC/USP

READ, H\_E; HEGEMIER, G. A. Strain softening of rock, soil and concrete—a review article. **Mechanics of Materials**, v. 3, n. 4, p. 271-294, 1984.

SAGONG, Myung; KIM, Sechul; PARK, Duhee. Development of a loading platen containing a cylindrical roller bearing to reduce frictional constraint at the boundary. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, n. 59, p. 97-104, 2013.

SANTIAGO, S. D.; HILSDORF, H. K. Fracture mechanisms of concrete under compressive loads. **Cement and Concrete Research**, v. 3, n. 4, p. 363-388, 1973.

SCHICKTER, G. **On the Influence of Differential Load Application Techniques on the Lateral Strain and Fracture of Concrete Specimens**. In: ICF3, Munich (Germany) 1973.

SIM, J. et al. Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 854-864, 2013.

SHAH, S. P.; CHOI, S.; JANSEN, D. C. **Strain softening of concrete in compression**. **Proceedings of Fracture Mechanics of Concrete Structures** (ed. FH Wittmann). AEDIFICATIO Publishers, Freiburg, v. 3, p. 1827-1841, 1996.

BAYKOV, V. N.; SIGALOV, E. E. **Estructuras de hormigón armado**. Editorial Mir, 1980.

TANG, C. A. et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression—part I: effect of heterogeneity. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 37, n. 4, p. 555-569, 2000.

TORRENTI, J. M.; ROYIS, P. Etude numérique du dimensionnement d'un appui anti-fretage pour le béton. **Materials and Structures**, v. 22, n. 2, p. 149-158, 1989.

TORRENTI, J. M.; BENAIJA, E. H.; BOULAY, C. Influence of boundary conditions on strain softening in concrete compression test. **Journal of engineering mechanics**, v. 119, n. 12, p. 2369-2384, 1993.

TORRENTI, J. M.; DJEBRI, B. Behaviour of steel-fibre-reinforced concretes under biaxial compression loads. **Cement and Concrete Composites**, v. 17, n. 4, p. 261-266, 1995.

TSCHEGG, E. K.; ELSER, M.; STANZL-TSCHEGG, S. E. Biaxial fracture tests on concrete - Development and experience. **Cement and Concrete Composites**, v. 17, n. 1, p. 57-75, 1995.

THURO, K. et al. Scale effects in rock strength properties. Part 1: Unconfined compressive test and Brazilian test. In: ISRM regional symposium, EUROCK. p. 169-174. 2001.

VAN MIER, J. G. M. et al. Strain-softening of concrete in uniaxial compression. **Materials and Structures**, v. 30, n. 4, p. 195-209, 1997.

VAN MIER, J. G. M. **Strain-softening of concrete under multiaxial loading conditions**. Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven, 1984.

VAN GEEL, E. **Concrete Behaviour in Multiaxial Compression: Experimental Research**. 1998. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade de Arquitetura da Universidade de Tecnologia de Eindhoven, Departamento de Design Estrutural, Eindhoven, 1998.

VAN VLIET, MR A.; VAN MIER, JG M. Experimental investigation of concrete fracture under uniaxial compression. **Mechanics of Cohesive-frictional Materials: An International Journal on Experiments, Modelling and Computation of Materials and Structures**, v. 1, n. 1, p. 115-127, 1996.

VIDAL C.D.M.; BANDEIRA M. V. V.; LA TORRE K. R.; KOSTESKI L. E. MARANGON E. Numerical and experimental evaluation of the anisotropic behavior and boundary condition of a structural concrete. **Construction and Building Materials**, 2020.

XU, Y. H. et al. Influence of end effect on rock strength in true triaxial compression test. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 54, n. 6, p. 862-880, 2017.

Xu, Y., Cai, M. **Numerical simulation of end constraint effect on post-peak behaviors of rocks in uniaxial compression**. 49th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, 2015.

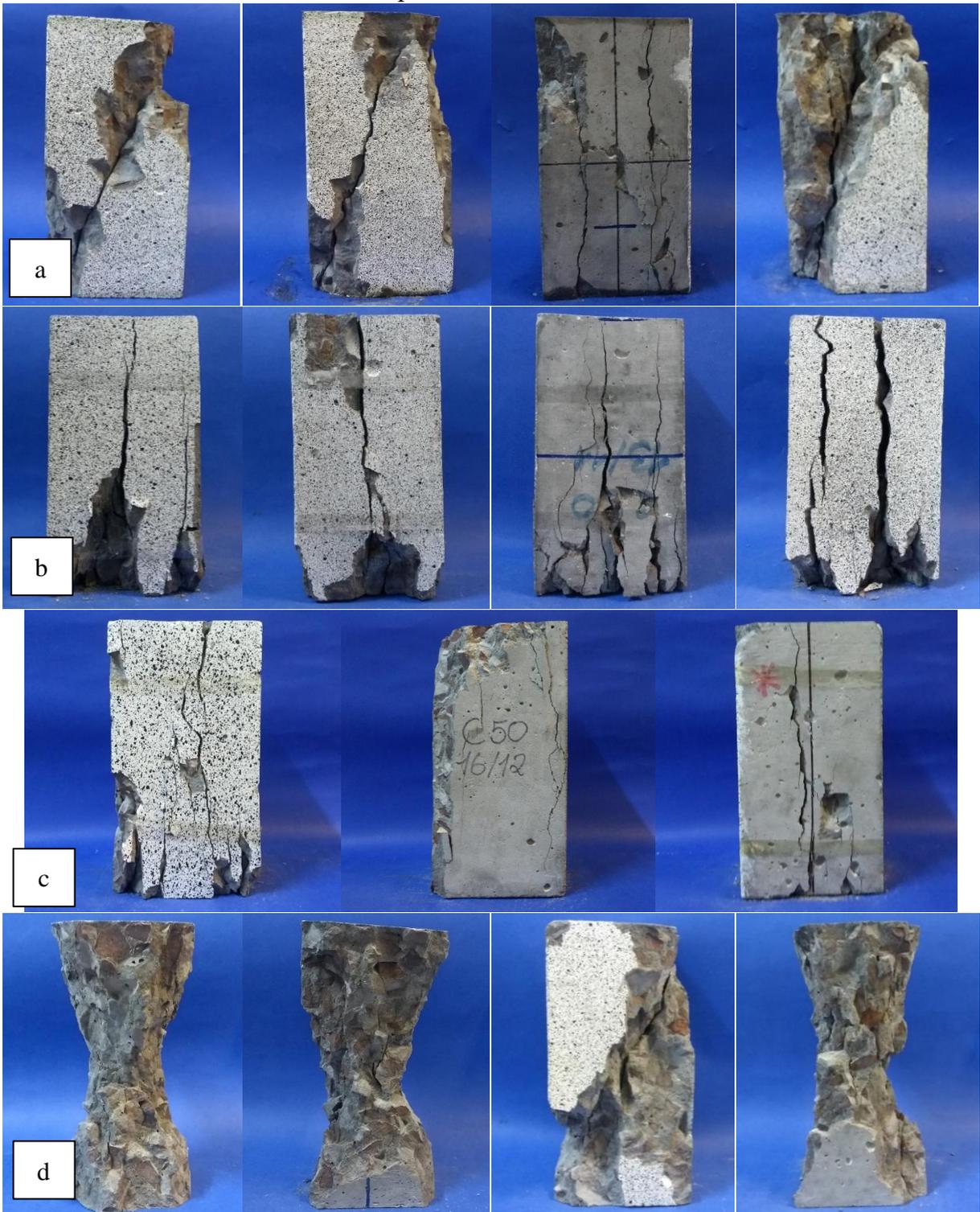
YI, S.; YANG, E.; CHOI, J. Effect of specimen sizes, specimen shapes, and placement directions on compressive strength of concrete. **Nuclear Engineering and Design**, v. 236, n. 2, p. 115-127, 2006.

## APÊNDICE I – Modo de Ruptura e Fissuração das Faces de Contato dos Espécimes

Figura 36 – Modo de ruptura dos espécimes cilíndricos do concreto C50 para cada condição de contorno: (a) Graxa, (b) Teflon, (c) Placa Escova, (d) Referência e (e) Chapas Coladas



Espécimes Prismáticos





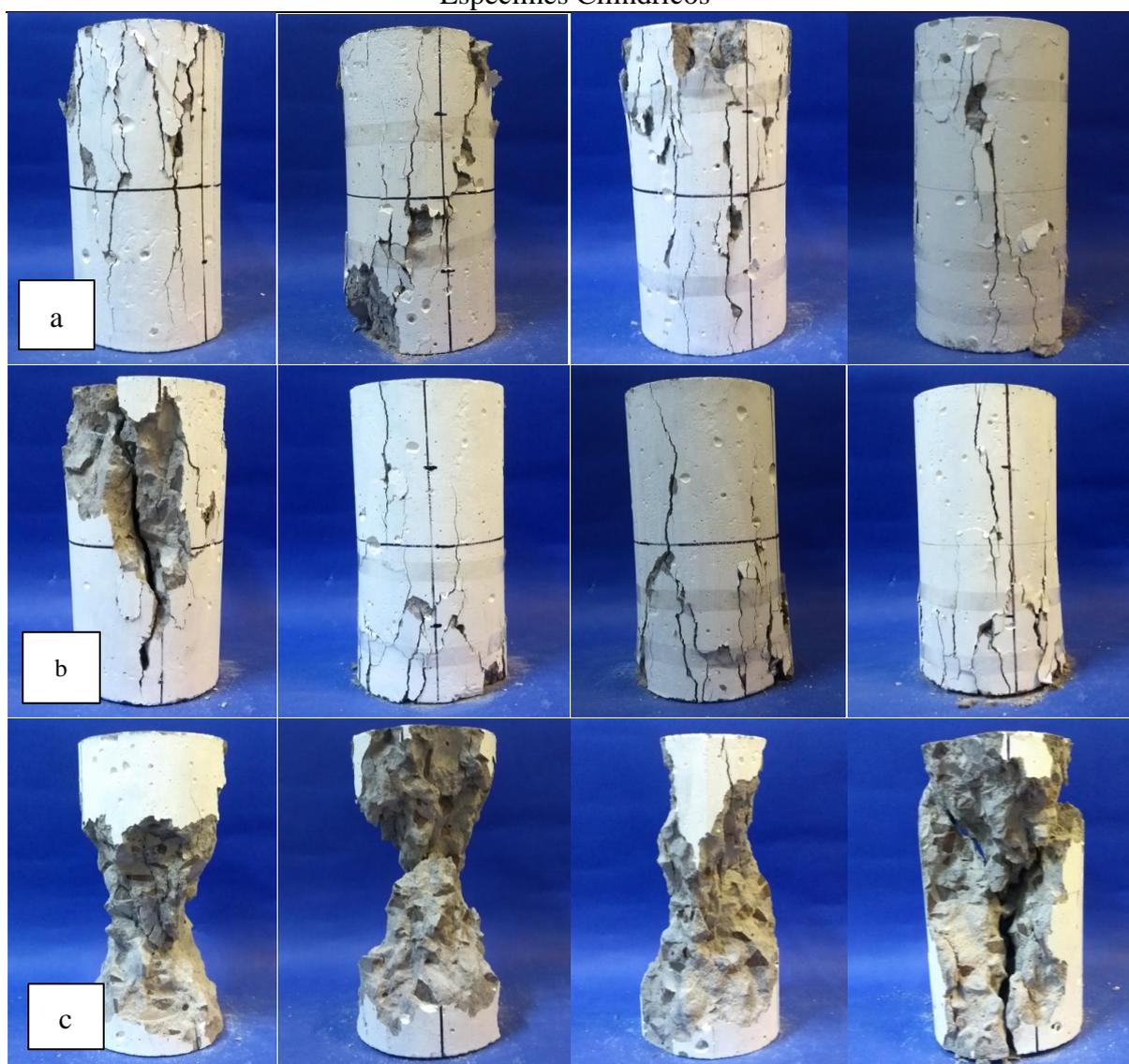
Especímenes Cilíndricos





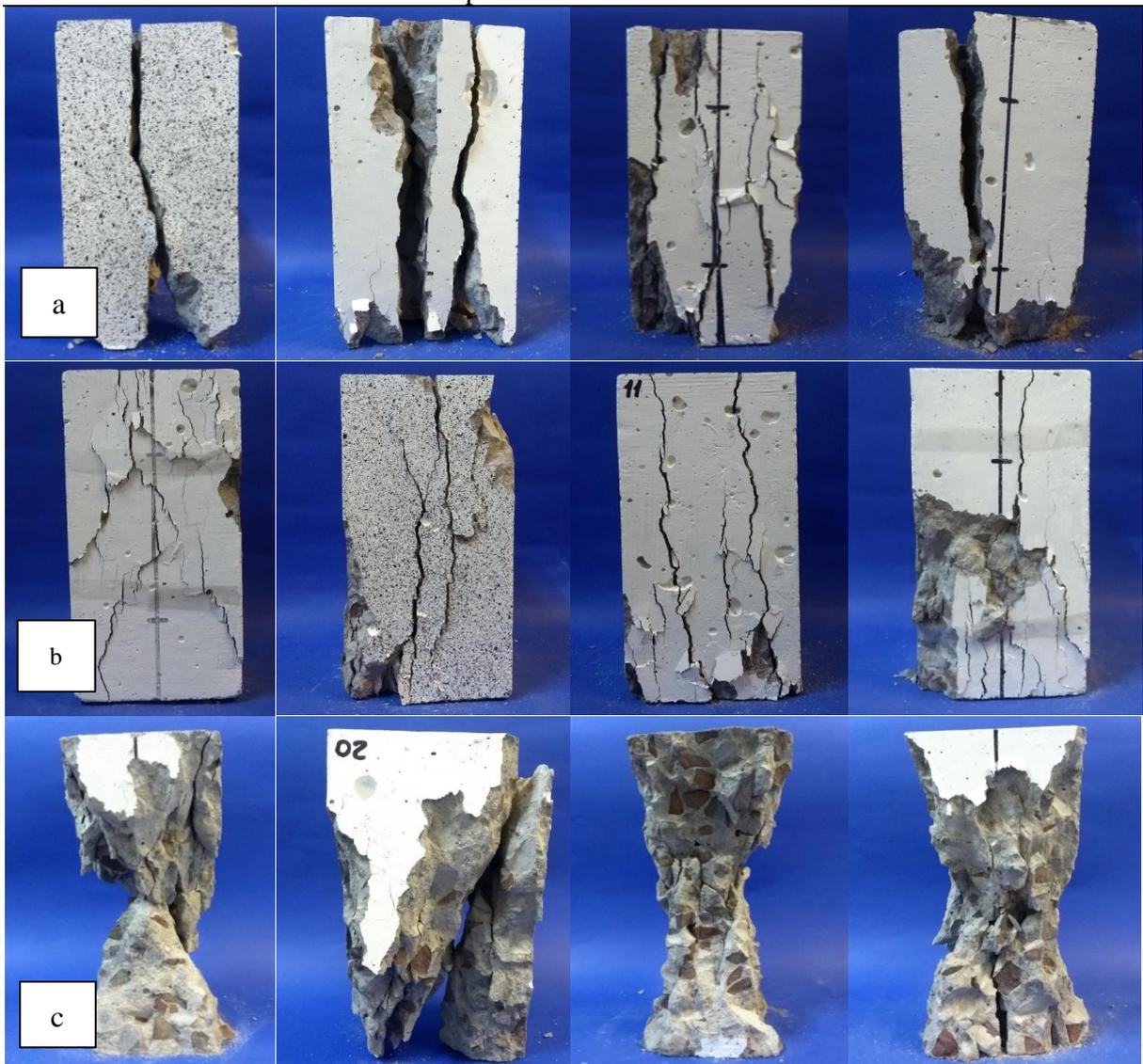
Figura 37 – Modo de ruptura dos espécimes cilíndricos do concreto C30 para cada condição de contorno: (a) Teflon, (b) Placa Escova, (c) Referência e (d) Chapas Coladas

Espécimes Cilíndricos





Especímenes Prismáticos





Espécimes Cúbicos

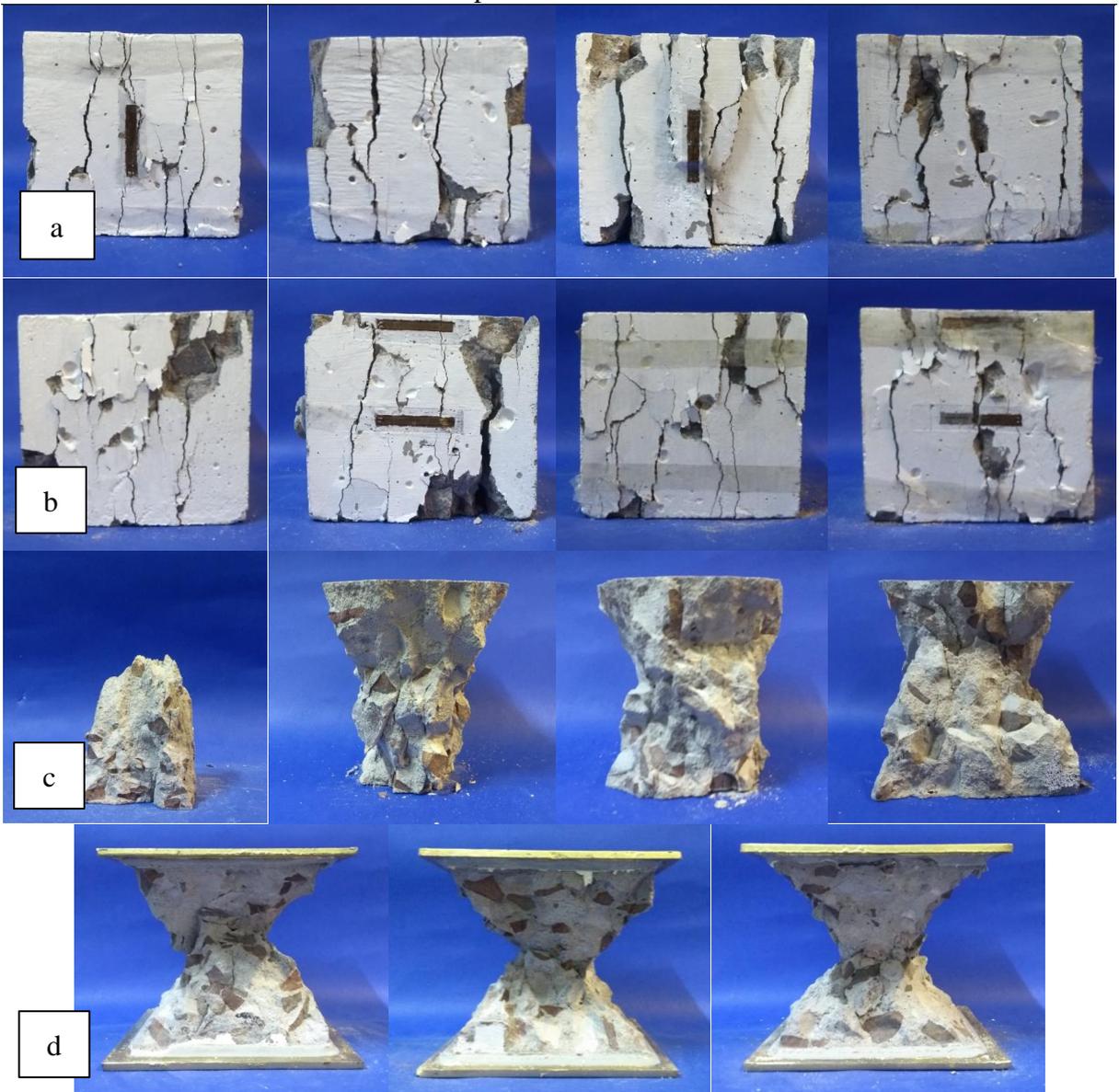
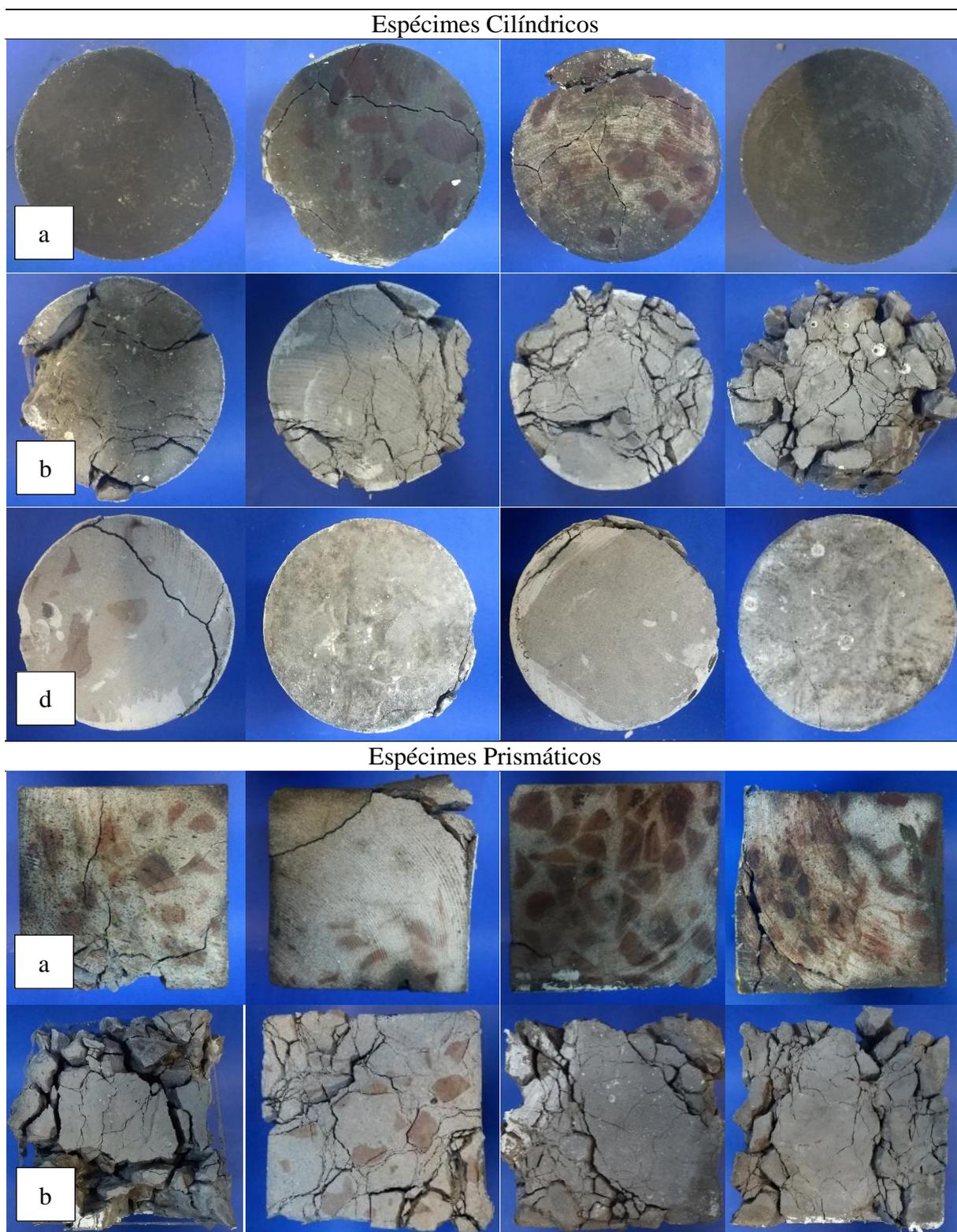
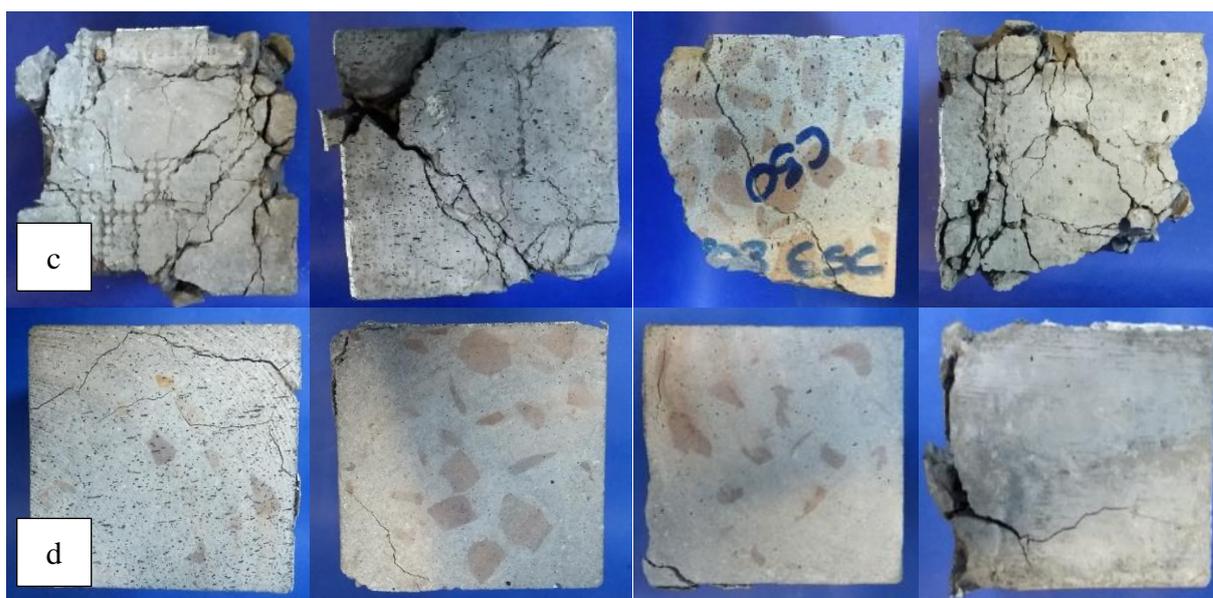


Figura 38 – Modo de fissuração das faces de contato dos espécimes para o concreto C50 para cada condição de contorno: (a) Graxa, (b) Teflon, (c) Placa Escova e (d) Referência





Especímenes Cúbicos

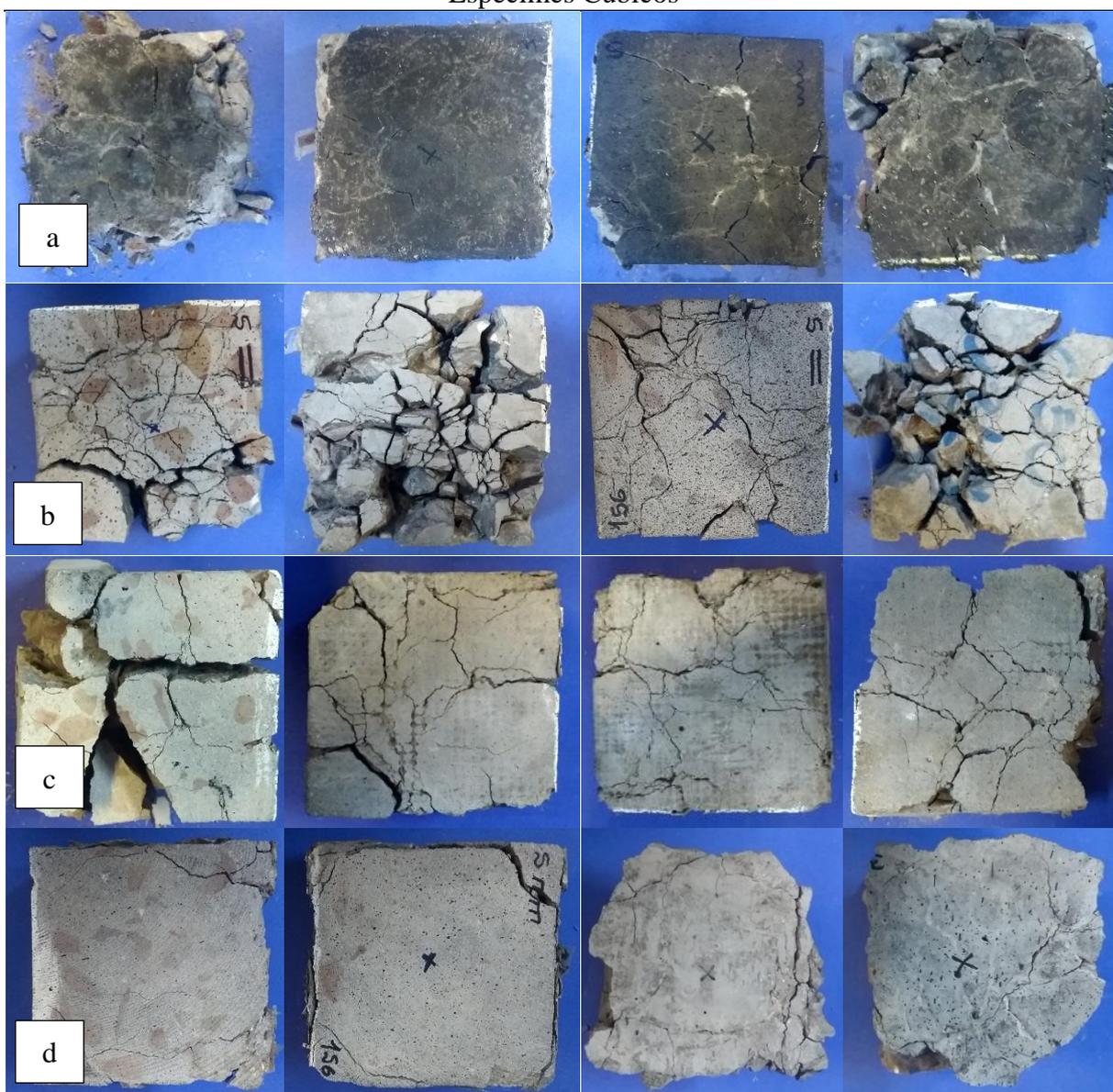
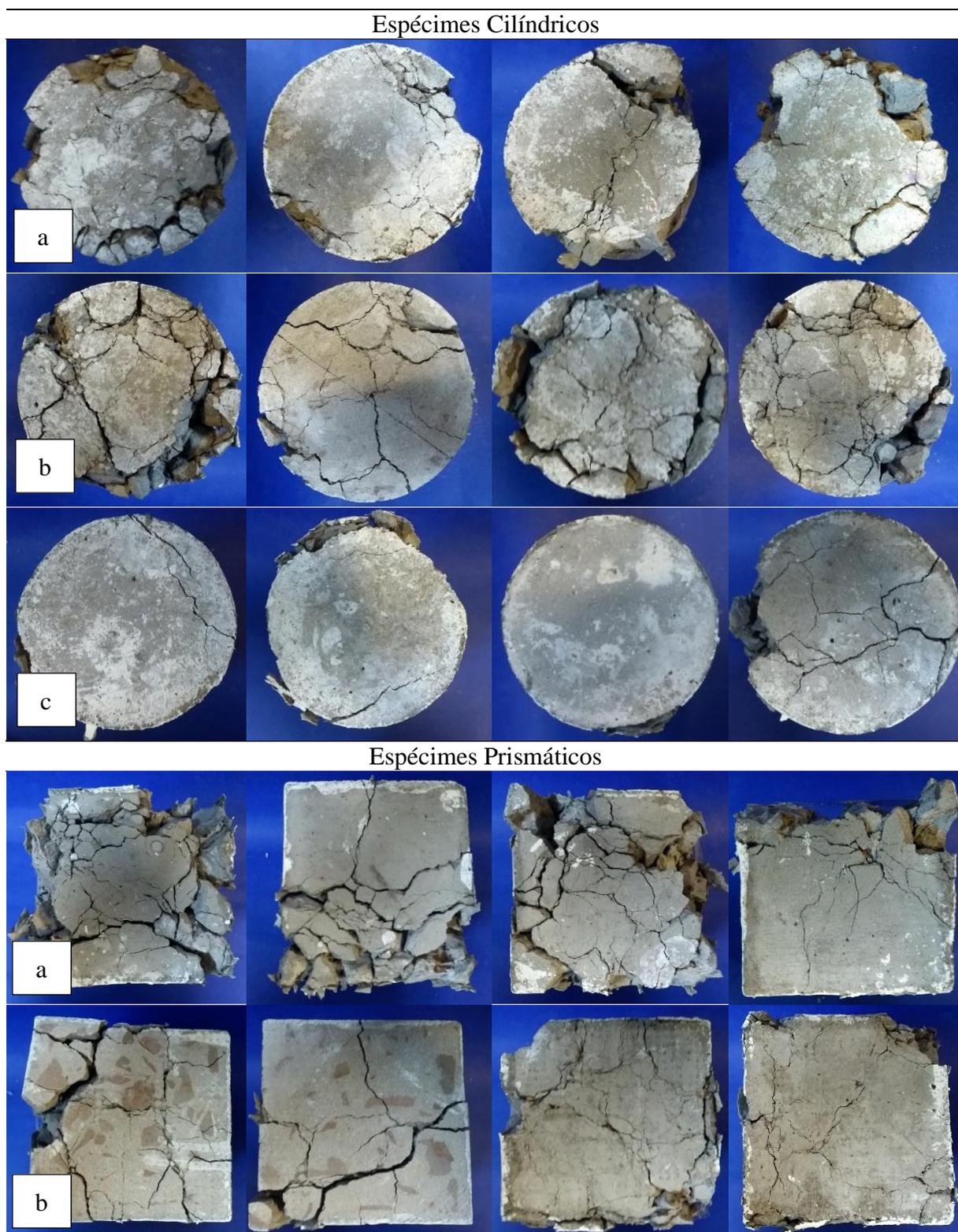
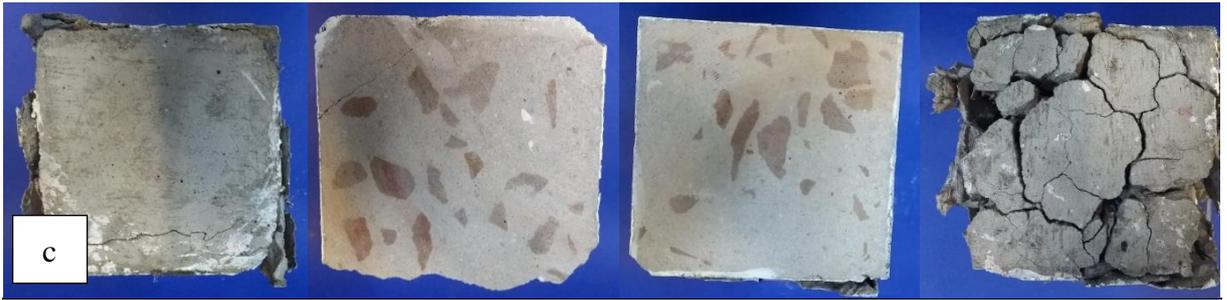
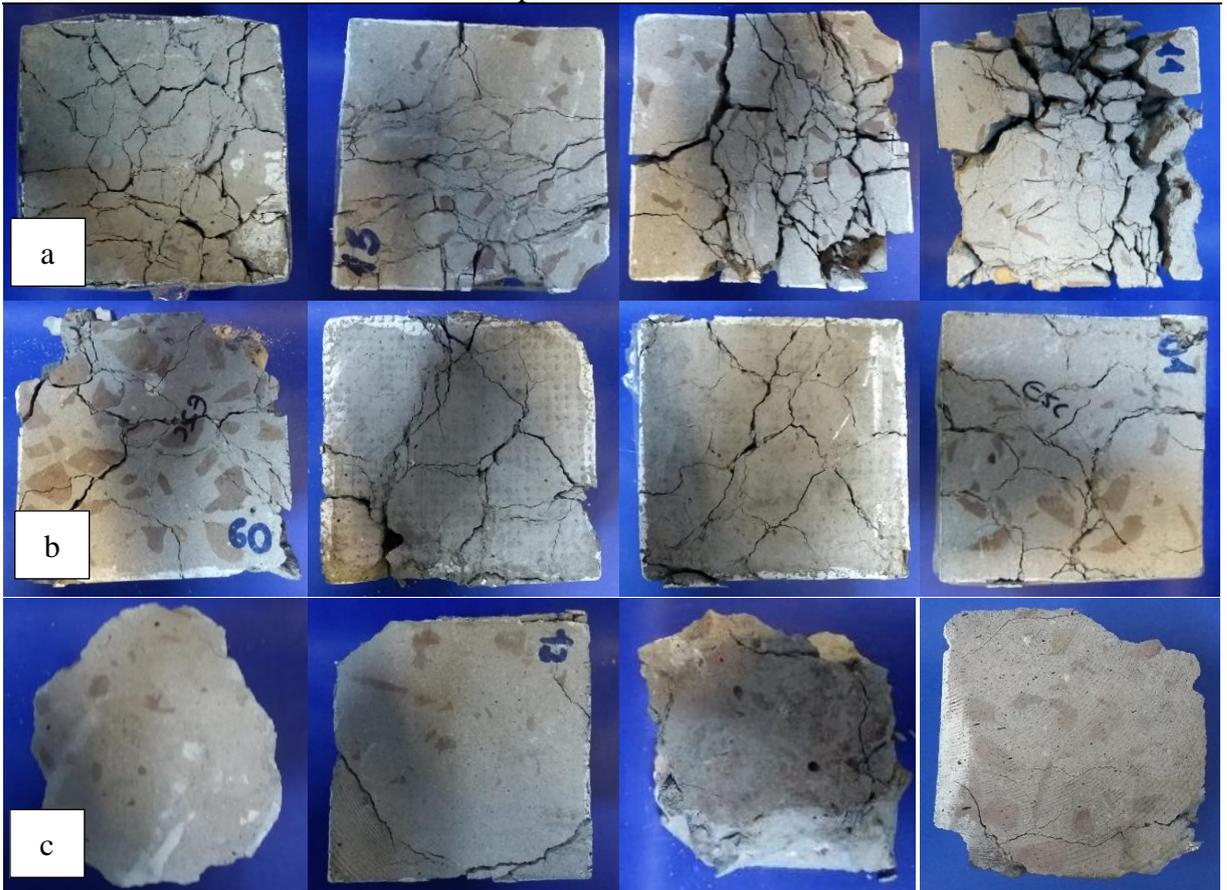


Figura 39 – Modo de fissuração das faces de contato dos espécimes para o concreto C30 para cada condição de contorno: (a) Teflon, (b) Placa Escova (c) Referência



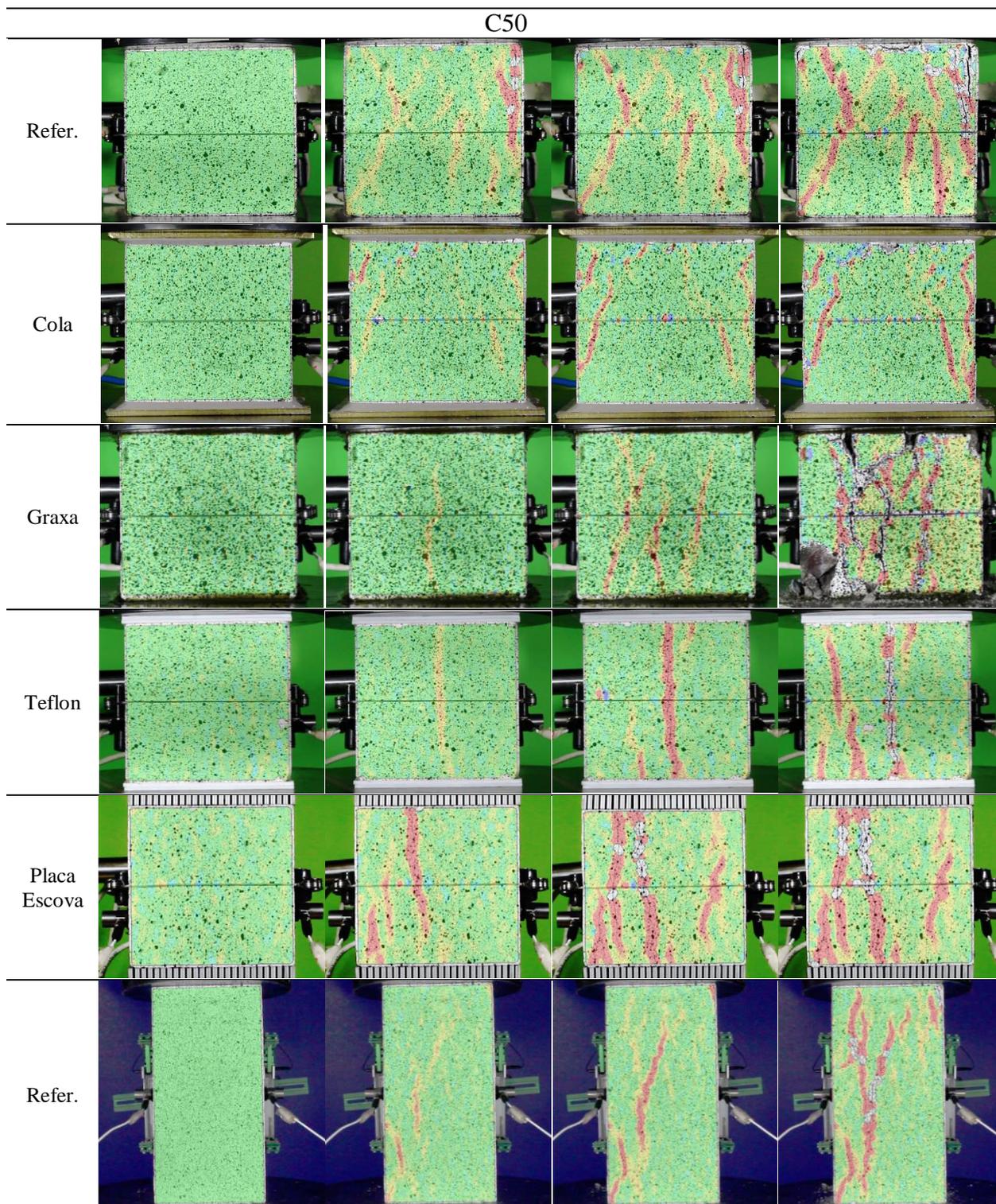


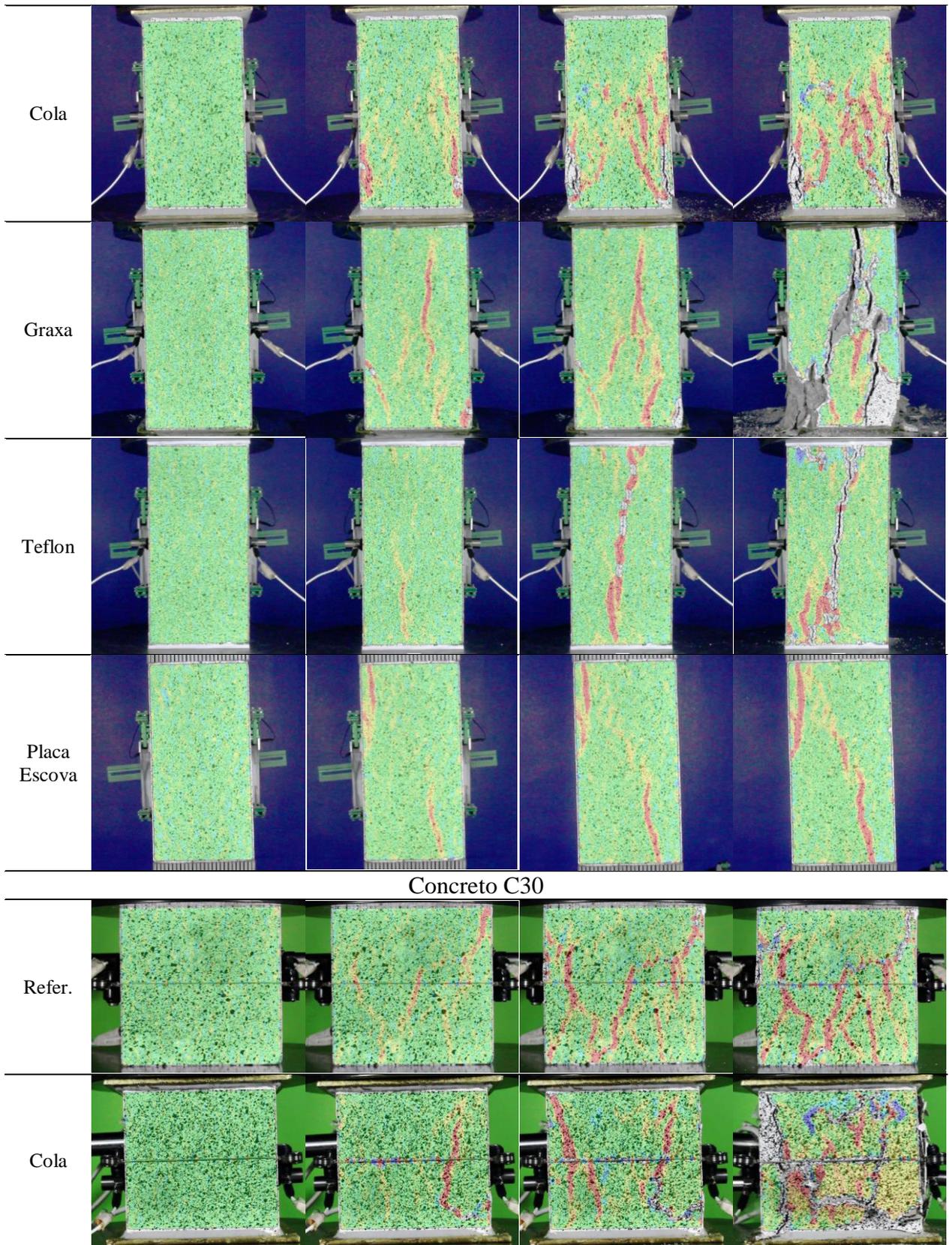
Espécimes Cúbicos

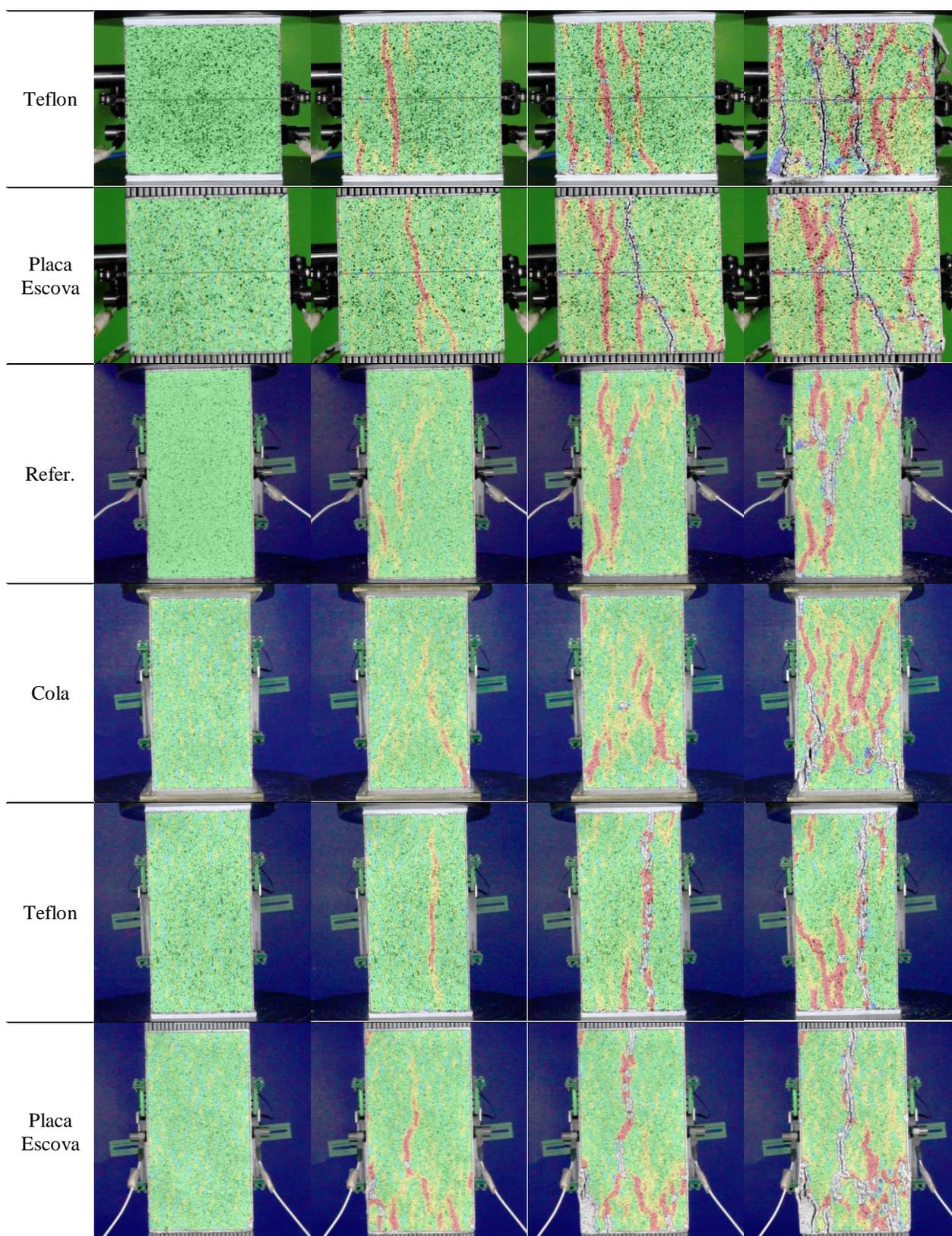


## APÊNDICE II – Modo de Fissuração Característico para cada Condição de Contorno

Figura 40 – Mapa de fissuração característico para os concretos C50 e C30 de acordo com cada condição de contorno para espécimes cúbicos e prismáticos desenvolvido pelo software GOM Correlate



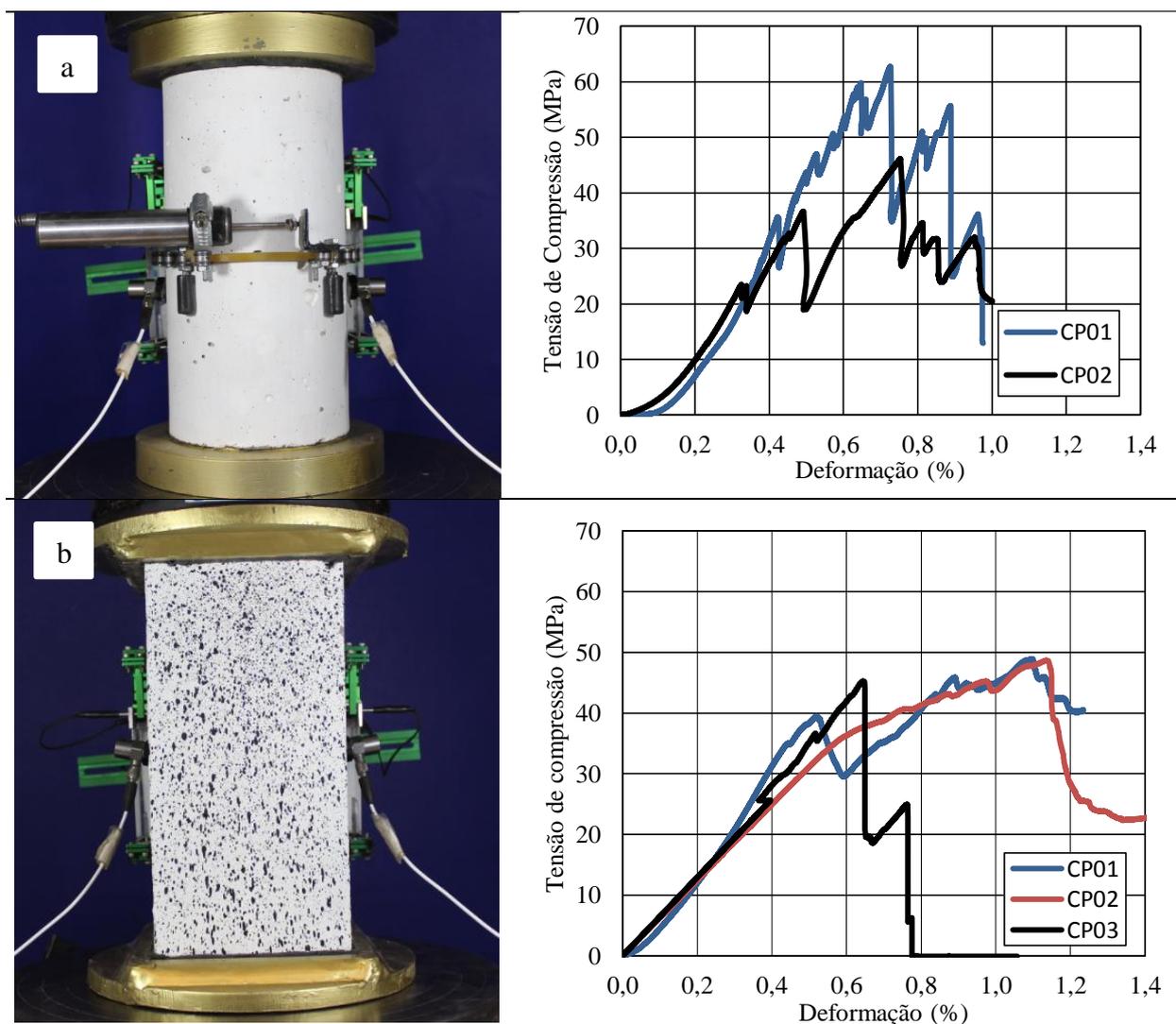


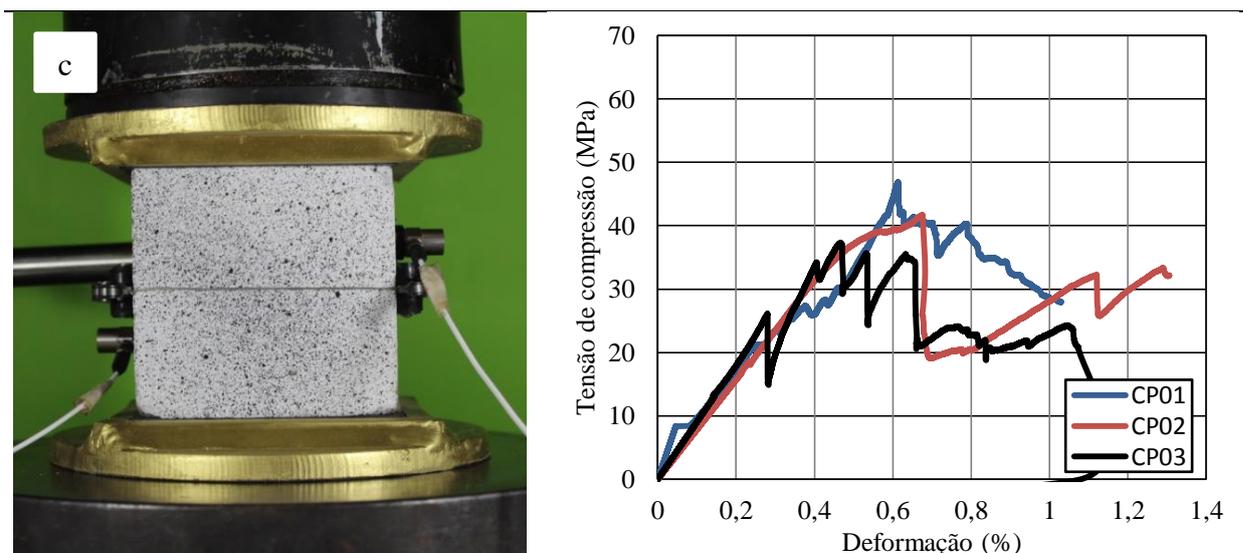


### APÊNDICE III – Ensaios de Compressão Axial com Neoprene

Realizaram-se ensaios de compressão axial com discos de neoprene com dureza 70 shore com espessura de 1cm como condição de contorno para cilindros, prismas e cubos. Os resultados apresentaram variação elevada de resistência à compressão e comportamento tensão x deformação, revelando uma inconsistência com resultados não representativos para o concreto C50. Devido aos resultados insatisfatórios encontrados para o concreto C50, não foram realizados ensaios com neoprene para o concreto C30. A Figura 41 apresenta imagens do procedimento de ensaio para cada geometria e as respectivas curvas tensão x deformação encontradas.

Figura 41 – Imagens dos ensaios de compressão com neoprene e curvas tensão x deformação de cilindros (a), prismas (b) e cubos (c) para o concreto C50





Os modos de ruptura característicos encontrados podem ser observados pela Figura 42. Para as três geometrias identificou-se um modo de ruptura similar em que uma fissura mais centralizada desenvolve-se promovendo uma ruptura abrupta do espécime. Os resultados insatisfatórios podem ser justificados pela dureza do neoprene escolhido para realização dos ensaios, visto que estes se deformavam de maneira excessiva durante o ensaio conforme mostra a Figura 43.

Figura 42 – Modos de ruptura característicos dos espécimes cilíndricos (a), prismáticos (b) e cúbicos (c) testados com neoprene e suas respectivas faces de contato fissuradas para o concreto C50

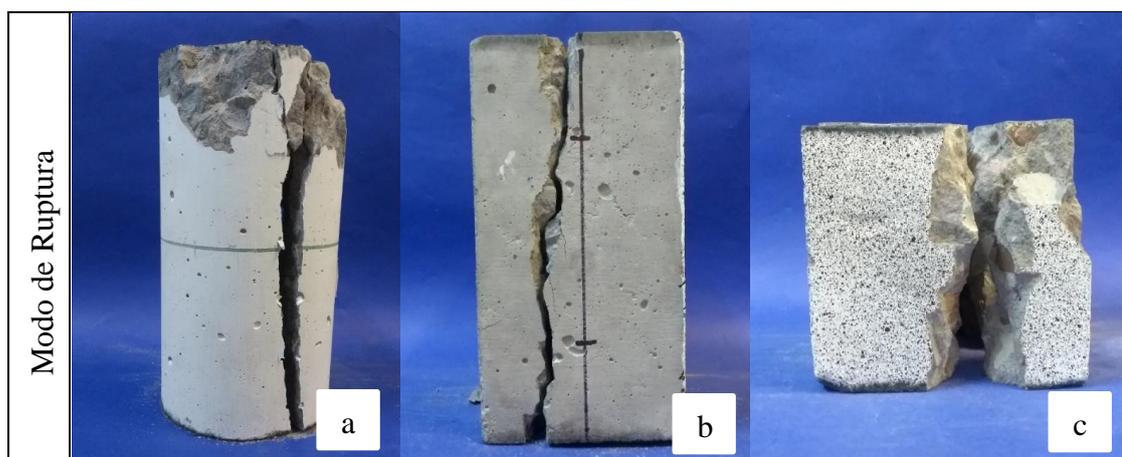




Figura 43 – Deformação do neoprene durante ensaios de compressão para o concreto C50 (a) e neoprene após termino de ensaio de compressão em espécimes cúbicos e prismáticos (b)

