

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas**

Jordane Gabriele Santos Alves

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE PRISMAS DE ALVENARIA  
DE SOLO-CIMENTO COM JUNTAS FINAS DE DIFERENTES  
MATERIAIS**

Belo Horizonte  
2025

Jordane Gabriele Santos Alves

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE PRISMAS DE ALVENARIA  
DE SOLO-CIMENTO COM JUNTAS FINAS DE DIFERENTES  
MATERIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Orientador: Prof. Dr. White José dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. Lucas Ribeiro dos Santos

Belo Horizonte  
2025

A474r	<p>Alves, Jordane Gabriele Santos. Resistência ao cisalhamento de prismas de alvenaria de solo-cimento com juntas finas de diferentes materiais / Jordane Gabriele Santos Alves. – 2025. 1 recurso online (180 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: White José dos Santos. Coorientador: Lucas Ribeiro dos Santos.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia de estruturas – Teses. 2. Resistência de materiais – Teses. 3. Cisalhamento – Teses. 4. Construção de solo-cimento – Teses. 5. Tijolos – Teses. I. Santos, White José dos. II. Santos, Lucas Ribeiro dos. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p>
-------	---

CDU: 624(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ESTRUTURAS

## **ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS Nº: 416 DA ALUNA JORDANE GABRIELE SANTOS ALVES.**

Às **08:00** horas do dia **11** do mês de **dezembro** de **2025**, reuniu-se em ambiente virtual, na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, a Comissão Examinadora indicada pelo Colegiado do Programa em **21 de novembro de 2025**, para julgar a defesa da Dissertação de Mestrado intitulada "**Resistência ao Cisalhamento de Prismas de Alvenaria de Solo-Cimento com Juntas Finas de Diferentes Materiais**", cuja aprovação é um dos requisitos para a obtenção do Grau de MESTRE EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS na área de ESTRUTURAS.

Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, **Prof. Dr. White José dos Santos**, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares passou a palavra à candidata para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa da candidata. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença da candidata e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Foram atribuídas as seguintes indicações: (Aprovado)

**Prof. Dr. White José dos Santos - EMC - UFMG (Orientador)**

**Prof. Dr. Lucas Ribeiro dos Santos - DEES - UFMG (Coorientador)**

**Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas - DEES - UFMG**

**Profa. Dra. Elaine Guglielmi Pavei Antunes - UNESC**

A aprovação da aluna na Defesa de Dissertação de Mestrado não significa que a mesma tenha cumprido todos os requisitos necessários para obtenção do DIPLOMA de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Para ciência da aluna:

1. Atesto que as alterações solicitadas pela Comissão Examinadora serão cumpridas no prazo de ATÉ 60 dias corridos.
2. Atesto estar ciente que a versão corrigida da Tese/dissertação deverá ser entregue ao Repositório Institucional da UFMG, conforme orientações disponíveis em: <https://repositorio.ufmg.br/custom/instructions.jsp>

**Ciente:**

**Jordane Gabriele Santos Alves**

---

Aluna

Belo Horizonte, 11 de dezembro de 2025.

Este documento não terá validade sem a assinatura do Coordenador do Programa de Pós-Graduação.

Após a Homologação da Defesa pelo Colegiado do Programa, este documento será assinado pela Coordenação e disponibilizado à aluna.



Documento assinado eletronicamente por **White Jose dos Santos, Professor do Magistério Superior**, em 11/12/2025, às 10:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Barreto Caldas, Professor do Magistério Superior**, em 11/12/2025, às 10:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Elaine Guglielmi Pavei Antunes, Usuária Externa**, em 11/12/2025, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Ribeiro dos Santos, Professor do Magistério Superior**, em 11/12/2025, às 14:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jordane Gabriele Santos Alves, Usuária Externa**, em 11/12/2025, às 17:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Lopes da Silva, Coordenador(a)**, em 12/12/2025, às 09:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4785483** e o código CRC **CC345A5D**.

Aos meus pais, com toda minha gratidão...

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Osmar e Fátima, pelo mais belo exemplo, maior amor e incomparável dedicação.

Às minhas irmãs Juliana e Janaina, pela amizade, pela inspiração e pelo inesgotável apoio.

À toda minha família, pelo incentivo e encorajamento.

Aos mestres, de ontem e de hoje, pela valiosa instrução, e aos colegas, pela generosidade e companhia na caminhada.

Na esfera institucional, agradeço à Escola de Engenharia e ao Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG pelas amplas oportunidades de formação e apoio estrutural.

Aos professores Dr. White José dos Santos e Dr. Lucas Ribeiro dos Santos, pela orientação, pelos ensinamentos e suporte ao longo de toda a pesquisa. Ao professor Dr. Rodrigo Barreto Caldas, pelo auxílio e aos graduandos Ana Paula Araújo e Samuel Oliveira, pela dedicação e apoio.

À equipe do Centro Multiusuário de Análise Experimental de Estruturas (CEMAEES-UFMG), em especial aos técnicos Geraldo, Heron, José e Tiago, pela presteza, cooperação e contribuição na fase experimental.

Aos responsáveis pelo Laboratório de Materiais Metálicos e pelo Núcleo de Extensão e Prestação de Serviços (NEPS) do Departamento de Química da UFMG pela disponibilidade de infraestrutura.

À FAPEMIG, à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro fundamental para a concretização desta pesquisa.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, a minha sincera gratidão.

E, sobretudo, agradeço a Deus: o Começo, o Fim e o Sentido de todas as coisas.

"A ciência estuda o que é; a engenharia cria o que nunca foi."

(Gustave Eiffel)

## RESUMO

Diante das discussões sobre sustentabilidade, especialmente na construção civil, se destaca o uso de tijolos de solo-cimento como materiais de construção que geram menos impactos ambientais. No entanto, as alvenarias compostas por esses tijolos muitas vezes se mostram inadequadas para resistir a cargas laterais extremas. Sob tais condições de carregamento, a resistência da alvenaria ao cisalhamento desempenha um importante papel. Assim, o presente estudo teve como objetivo principal investigar o impacto de diferentes materiais de assentamento - argamassa colante (AC), argamassa polimérica (AP) e cola acrílica (CA) - aplicados em camadas finas, na resistência ao cisalhamento de prismas de alvenaria construídos por tijolos de solo-cimento. Após a caracterização dos materiais, prismas compostos por três tijolos foram ensaiados sob esforços de cisalhamento, enquanto submetidos a diferentes níveis de pré-compressão. Por meio da técnica de Correlação de Imagens Digitais (DIC), realizou-se uma análise das deformações e da relação tensão-deformação das juntas. A fim de analisar a influência do tipo de material de assentamento e da pré-compressão sobre o comportamento mecânico dos prismas, foi conduzido um estudo estatístico por meio da Análise de Variância (ANOVA). Em seguida, foram determinados os parâmetros de resistência ao cisalhamento, segundo o critério de Mohr-Coulomb. As juntas AP destacaram-se pela alta coesão, garantindo resistência superior em baixas tensões de compressão. Em contraste, as juntas AC e CA apresentaram elevados coeficientes de atrito, demonstrando uma forte dependência da compressão para o ganho de resistência. O estudo concluiu que a pré-compressão influenciou distintamente a resistência ao cisalhamento de cada tipo de junta, mas não o módulo de cisalhamento. O modo de falha predominante ocorreu por tração diagonal induzida nos tijolos de solo-cimento, confirmando que a resistência da interface superou a resistência das unidades de alvenaria. A partir do nível intermediário de pré-compressão, todos os tipos de juntas convergiram para um patamar de resistência estatisticamente equivalente, provando a viabilidade estrutural das três soluções de juntas finas em alvenarias de solo-cimento.

Palavras-chave: solo-cimento; alvenaria; cisalhamento; pré-compressão; coesão; atrito; tração diagonal.

## ABSTRACT

In light of discussions about sustainability, especially in civil construction, the use of soil-cement bricks stands out as a building material that generates less environmental impact. However, masonry made from these bricks often proves inadequate to withstand extreme lateral loads. Under such loading conditions, the shear strength of the masonry plays an important role. Thus, the main objective of this study was to investigate the impact of different bedding materials - adhesive mortar (AC), polymer mortar (AP), and acrylic adhesive (CA) - applied in thin layers, on the shear strength of masonry prisms constructed from soil-cement bricks. After characterizing the materials, prisms composed of three bricks were tested under shear stress while subjected to different levels of pre-compression. Using the Digital Image Correlation (DIC) technique, an analysis of the deformations and stress-strain relationship of the prisms was performed. In order to analyze the influence of the type of bedding material and pre-compression on the mechanical behavior of the prisms, a statistical study was conducted using Analysis of Variance (ANOVA). Subsequently, shear strength parameters were determined according to the Mohr-Coulomb criterion. AP joints stood out for their high cohesion, guaranteeing superior resistance at low compressive stresses. In contrast, AC and CA joints presented high coefficients of friction, demonstrating a strong dependence on compression for strength gain. The study concluded that pre-compression distinctly influenced the shear strength of each type of joint, but not the shear modulus. The predominant failure mode occurred due to induced diagonal tension in the soil-cement bricks, confirming that the interface strength exceeded the strength of the masonry units. From the intermediate level of pre-compression, all types of joints converged to a statistically equivalent strength level, proving the structural viability of the three thin joint solutions in soil-cement masonry.

Keywords: soil-cement; masonry; shear; pre-compression; cohesion; friction; diagonal tension.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> – Padrão de falha das amostras: (a) argamassa de cimento e areia; (b) argamassa de argila e areia; (c) argamassa de escória e areia.....	27
<b>Figura 2.2</b> – Estados de tensão em (a) prismas produzidos com unidades mais rígidas que a argamassa e sob uma tensão de compressão $\sigma_v$ ; (b) prismas produzidos com unidades menos rígidas que a argamassa e sob uma tensão de compressão $\sigma_v$ .....	32
<b>Figura 2.3</b> – Relação entre a espessura das juntas e a resistência a compressão.....	34
<b>Figura 2.4</b> – Efeito da variação da espessura da junta de argamassa sobre a resistência à compressão da alvenaria.....	36
<b>Figura 2.5</b> – Modos de falha típicos de paredes de alvenaria, sujeitas a cargas no plano: (a) ruptura por flexão, com esmagamento do canto da alvenaria; (b) ruptura por cisalhamento diagonal; (c) ruptura por cisalhamento deslizante. ....	40
<b>Figura 2.6</b> – Métodos de ensaio de cisalhamento em alvenarias: (a) teste de cisalhamento pareado; (b) teste por compressão diagonal; (c) teste <i>triplet</i> ou triplo. ....	41
<b>Figura 2.7</b> – Modos de falha de alvenarias sob cisalhamento: (a) juntas tradicionais (10 mm); (b) juntas secas.....	43
<b>Figura 3.1</b> – Ensaio de resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento. ....	46
<b>Figura 3.2</b> – Ensaio mecânico de caracterização da argamassa colante: (a) resistência à tração na flexão; (b) resistência à compressão.....	48
<b>Figura 3.3</b> – Aplicação dos materiais de assentamento em camadas finas: (a) argamassa colante; (b) argamassa polimérica; (c) cola acrílica. ....	49
<b>Figura 3.4</b> – Aplicação dos materiais de assentamento sobre a superfície dos tijolos de solo-cimento: (a) argamassa colante; (b) argamassa polimérica; (c) cola acrílica.....	50
<b>Figura 3.5</b> – Prisma de alvenaria para o ensaio de cisalhamento. ....	51
<b>Figura 3.6</b> – Esquema de carregamento dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento.	51
<b>Figura 3.7</b> – Peças do dispositivo usado na realização dos ensaios de cisalhamento.....	52
<b>Figura 3.8</b> – Esquema do dispositivo montado para a realização dos ensaios <i>triplet</i> .....	52
<b>Figura 3.9</b> – Execução do ensaio de cisalhamento: (a) prisma posicionado na prensa; (b) monitoramento das deformações aplicadas. ....	54
<b>Figura 3.10</b> – Gráfico da resistência ao cisalhamento ( $\tau$ ) vs. tensão de pré-compressão ( $\sigma_c$ ). 57	
<b>Figura 3.11</b> – Três padrões <i>speckle</i> com diâmetro de 5 pixels e uma cobertura de (a) 10%, (b) 30% e (c) 50%. ....	59

<b>Figura 3.12</b> – Rastreamento do deslocamento de uma faceta ou <i>subset</i> .....	59
<b>Figura 3.13</b> – Prisma após aplicação do padrão <i>speckle</i> .....	60
<b>Figura 3.14</b> – Parâmetros para a análise DIC: (a) principais propriedade das facetas; (b) tamanho e sobreposição das facetas empregadas no presente estudo.....	61
<b>Figura 4.1</b> – Tijolos de solo-cimento: perfil cristalográfico.....	66
<b>Figura 4.2</b> – Dimensões dos tijolos de solo-cimento.....	66
<b>Figura 4.3</b> – Argamassa colante: perfil cristalográfico (DRX).....	68
<b>Figura 4.4</b> – Argamassa colante ACIII: (a) resistência à tração na flexão; (b) resistência à compressão.....	69
<b>Figura 4.5</b> – Argamassa polimérica: perfil cristalográfico (DRX).....	70
<b>Figura 4.6</b> – Argamassa polimérica: espectro de absorção no infravermelho.....	71
<b>Figura 4.7</b> – Cola acrílica: espectro de absorção no infravermelho.....	72
<b>Figura 4.8</b> – Distribuição estatística e variabilidade do módulo de cisalhamento ( $G$ ) para as diferentes juntas.....	77
<b>Figura 4.9</b> – Módulo de cisalhamento médio: (a) curvas médias $\tau$ vs. $\gamma$ ; (b) detalhe da inclinação do trecho inicial das curvas.....	79
<b>Figura 4.10</b> – Distribuição estatística e variabilidade da deformação de ruptura ( $\gamma_{rup}$ ) para as diferentes juntas.....	81
<b>Figura 4.11</b> – Influência da pré-compressão ( $\sigma_c$ ) sobre a resistência ao cisalhamento ( $\tau_{rup, média}$ ): (a) evolução dos valores absolutos e (b) variação percentual relativa à resistência inicial (coesão).....	87
<b>Figura 4.12</b> – Distribuição estatística e variabilidade da tensão de ruptura ( $\tau_{rup}$ ) para as diferentes juntas.....	88
<b>Figura 4.13</b> – Determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras AC, AP e CA.....	90
<b>Figura 4.14</b> – Parâmetros de resistência ao cisalhamento: coesão ( $c$ ).....	91
<b>Figura 4.15</b> – Parâmetros de resistência ao cisalhamento: coeficiente de atrito ( $tg(\varphi)$ ).....	92
<b>Figura 4.16</b> – Parâmetros de resistência ao cisalhamento: comparação com os valores normativos.....	94
<b>Figura 4.17</b> – Valores de resistência inicial ao cisalhamento ou coesão ( $c$ ) obtidos em diferentes estudos.....	98
<b>Figura 4.18</b> – Valores de coeficiente de atrito ( $tg(\varphi)$ ) obtidos em diferentes estudos.....	99
<b>Figura 4.19</b> – Nomenclatura adotada para as fissuras identificadas nas amostras de alvenaria após os ensaios.....	101

<b>Figura 4.20</b> – Detalhamento dos modos de falha típicos observados nos prismas AC: (a) Fissura vertical na junta esquerda, FV (JE) e fissura diagonal na unidade do meio, FD (UM) no prisma P <sub>AC1</sub> ( $\sigma_c = 0,1$ MPa); (b) Fissura interna na unidade do meio, FI (UM), com arrancamento de material na junta direita, ARR (JD) no prisma P <sub>AC4</sub> ( $\sigma_c = 0,3$ MPa); (c) Fissura interna, FI (UM) e arrancamento, ARR (JD) no prisma P <sub>AC8</sub> sob máxima pré-compressão ( $\sigma_c = 0,5$ MPa). ...	103
<b>Figura 4.21</b> – Detalhamento dos modos de falha típicos observados nos prismas AP: (a) Fissura vertical nas juntas esquerda e direita, FV (JE+JD) no prisma P <sub>AP3</sub> ( $\sigma_c = 0,1$ MPa); (b) Fissura interna na unidade direita, FI (UD), com arrancamento de material na junta direita, ARR (JD) no prisma P <sub>AP4</sub> ( $\sigma_c = 0,3$ MPa); (c) Fissura horizontal nas três unidades, FI (UE+UM+UD) sem separação nas juntas no prisma P <sub>AP8</sub> sob máxima pré-compressão ( $\sigma_c = 0,5$ MPa). .....	106
<b>Figura 4.22</b> – Detalhamento dos modos de falha típicos observados nos prismas CA: (a) Fissura horizontal na unidade do meio, FH (UM), no prisma P <sub>CA2</sub> ( $\sigma_c = 0,1$ MPa); (b) Fissura horizontal na unidade do meio, FH (UM) e fissura diagonal nas unidades esquerda e do meio, FD (UE+UM) no prisma P <sub>CA6</sub> ( $\sigma_c = 0,3$ MPa); (c) Fissura horizontal na unidade do meio, FH (UM) no prisma P <sub>CA8</sub> sob máxima pré-compressão ( $\sigma_c = 0,5$ MPa). Destaque para a não separação das juntas (NSEP) em todas as amostras.....	108
<b>Figura 4.23</b> – Prismas CA: deslocamento entre unidades; alta deformação da cola e falha da unidade. ....	110
<b>Figura A.1</b> – Tijolos de solo-cimento: perfil cristalográfico.....	133
<b>Figura A.2</b> – Argamassa colante: perfil cristalográfico (DRX). ....	135
<b>Figura A.3</b> – Argamassa polimérica: perfil cristalográfico (DRX). ....	137
<b>Figura A.4</b> – Argamassa polimérica: espectro de absorção no infravermelho.....	138
<b>Figura A.5</b> – Cola acrílica: espectro de absorção no infravermelho.....	140
<b>Figura B.1</b> – Prismas AC; $\sigma_c = 0,1$ MPa. ....	142
<b>Figura B.2</b> – Prismas AP; $\sigma_c = 0,1$ MPa.....	143
<b>Figura B.3</b> – Prismas CA; $\sigma_c = 0,1$ MPa. ....	144
<b>Figura B.4</b> – Prismas AC; $\sigma_c = 0,3$ MPa. ....	145
<b>Figura B.5</b> – Prismas AP; $\sigma_c = 0,3$ MPa.....	146
<b>Figura B.6</b> – Prismas CA; $\sigma_c = 0,3$ MPa. ....	147
<b>Figura B.7</b> – Prismas AC; $\sigma_c = 0,5$ MPa. ....	148
<b>Figura B.8</b> – Prismas AP; $\sigma_c = 0,5$ MPa.....	149
<b>Figura B.9</b> – Prismas CA; $\sigma_c = 0,5$ MPa. ....	150
<b>Figura C.1</b> – Padrões de fissuração dos prismas AC após a ruptura por cisalhamento. ....	151

<b>Figura C.2</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma $P_{AC1}$ ( $\sigma_c = 0,1$ MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); diagonal, FD(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JE).....	152
<b>Figura C.3</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma $P_{AC2}$ ( $\sigma_c = 0,1$ MPa), evidenciando fissuras: vertical, FV(JE); horizontal e interna, FH+FI(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JE).....	153
<b>Figura C.4</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma $P_{AC3}$ ( $\sigma_c = 0,1$ MPa), evidenciando fissuras: vertical, FV(JE); horizontais (UE+UM), interna e diagonal, FI+FD(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD).....	154
<b>Figura C.5</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma $P_{AC4}$ ( $\sigma_c = 0,3$ MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); interna FI(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD). ....	155
<b>Figura C.6</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma $P_{AC5}$ ( $\sigma_c = 0,3$ MPa), evidenciando fissuras: vertical, FV(JD). ....	156
<b>Figura C.7</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma $P_{AC6}$ ( $\sigma_c = 0,3$ MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); interna FI(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD). ....	157
<b>Figura C.8</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma $P_{AC7}$ ( $\sigma_c = 0,5$ MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); separação e arrancamento de material nas interfaces, ARR(JE+JD).....	158
<b>Figura C.9</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma $P_{AC8}$ ( $\sigma_c = 0,5$ MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JD); interna, FI(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD).....	159
<b>Figura C.10</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma $P_{AC9}$ ( $\sigma_c = 0,5$ MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JE).....	160
<b>Figura C.11</b> – Padrões de fissuração dos prismas AP após a ruptura por cisalhamento. ....	161
<b>Figura C.12</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma $P_{AP1}$ ( $\sigma_c = 0,1$ MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); horizontal, FH(UE); separação e arrancamento de material nas interfaces, ARR(JE+JD). ....	162
<b>Figura C.13</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma $P_{AP2}$ ( $\sigma_c = 0,1$ MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD+UM+UD); diagonal e interna, FD+FI(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD).....	163

<b>Figura C.14</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>AP3</sub> ( $\sigma_c = 0,1$ MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JE).....	164
<b>Figura C.15</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>AP4</sub> ( $\sigma_c = 0,3$ MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); diagonal e interna, FD+FI(UD); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD).....	165
<b>Figura C.16</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>AP5</sub> ( $\sigma_c = 0,3$ MPa), evidenciando fissuras: vertical, FV(JD); diagonal FD(UD); internas, FI(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD).....	166
<b>Figura C.17</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>AP6</sub> ( $\sigma_c = 0,3$ MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); horizontal, diagonal e interna, FH+FD+FI(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD).....	167
<b>Figura C.18</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>AP7</sub> ( $\sigma_c = 0,5$ MPa), evidenciando fissuras: horizontais, FH(UE+UM); sem separação das unidades. ....	168
<b>Figura C.19</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>AP8</sub> ( $\sigma_c = 0,5$ MPa), evidenciando fissuras: horizontais, FH(UE+UM+UD); sem separação das unidades. ....	169
<b>Figura C.20</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>AP9</sub> ( $\sigma_c = 0,5$ MPa), evidenciando fissuras: vertical, FV (UE); horizontais, FH(UM+UD); sem separação das unidades.....	170
<b>Figura C.21</b> – Padrões de fissuração dos prismas CA após a ruptura por cisalhamento. ....	171
<b>Figura C.22</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>CA1</sub> ( $\sigma_c = 0,1$ MPa), evidenciando fissuras: horizontais, FH(UM); diagonais, FD(UE+UM); sem separação das unidades.....	172
<b>Figura C.23</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>CA2</sub> ( $\sigma_c = 0,1$ MPa), evidenciando fissuras: horizontais, FH(UM); diagonal, FD(UM); sem separação das unidades. ....	173
<b>Figura C.24</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>CA3</sub> ( $\sigma_c = 0,1$ MPa), evidenciando fissuras: horizontais, FH(UM); sem separação das unidades. ....	174
<b>Figura C.25</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>CA4</sub> ( $\sigma_c = 0,3$ MPa), evidenciando fissuras: horizontais, FH(UM); sem separação das unidades. ....	175
<b>Figura C.26</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>CA5</sub> ( $\sigma_c = 0,3$ MPa), evidenciando fissuras: horizontais, FH(UM+UD); sem separação das unidades.....	176

<b>Figura C.27</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>CA6</sub> ( $\sigma_c = 0,3$ MPa), evidenciando fissuras: horizontal, FH(UM); diagonais, FD(UE+UM+UD); sem separação das unidades.....	177
<b>Figura C.28</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>CA7</sub> ( $\sigma_c = 0,5$ MPa), evidenciando fissuras: horizontais, FH(UM); sem separação das unidades. ....	178
<b>Figura C.29</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>CA8</sub> ( $\sigma_c = 0,5$ MPa), evidenciando fissuras: horizontal, FH(UM); sem separação das unidades.....	179
<b>Figura C.30</b> – Registro detalhado do modo de falha do prisma P <sub>CA9</sub> ( $\sigma_c = 0,5$ MPa), evidenciando fissuras: horizontal, FH(UM); diagonais, FD(UE+UM); sem separação das unidades.....	180

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> – Espessura de juntas de alvenaria – Especificações.....	33
<b>Tabela 2.2</b> – Modelo de previsão da resistência à compressão com alteração da espessura da junta.....	35
<b>Tabela 3.1</b> – Cálculo da deformação aplicada às barras de aço, conforme os níveis de pré-compressão. ....	53
<b>Tabela 3.2</b> – Área efetiva (área líquida) de cisalhamento conforme material de assentamento. ....	56
<b>Tabela 3.3</b> – Variáveis da Análise de Variância (ANOVA). ....	62
<b>Tabela 4.1</b> – Tijolos de solo-cimento: principais resultados da análise FRX (%). ....	65
<b>Tabela 4.2</b> – Tijolos de solo-cimento: resistência à compressão. ....	67
<b>Tabela 4.3</b> – Argamassa colante: análise FRX (%). ....	67
<b>Tabela 4.4</b> – Argamassa polimérica: análise FRX (%). ....	70
<b>Tabela 4.5</b> – Resultados individuais e médios do módulo de cisalhamento ( $G$ ) das juntas. ....	75
<b>Tabela 4.6</b> – Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para $G$ . ....	76
<b>Tabela 4.7</b> – Estatística descritiva e coeficientes de variação para o módulo de cisalhamento ( $G$ ) das juntas. ....	77
<b>Tabela 4.8</b> – Resultados individuais e médios da deformação de ruptura ( $\gamma_{rup}$ ) das juntas. ....	80
<b>Tabela 4.9</b> – Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para $\gamma_{rup}$ . ....	81
<b>Tabela 4.10</b> – Estatística descritiva e coeficientes de variação da deformação de ruptura ( $\gamma_{rup}$ ) das juntas. ....	82
<b>Tabela 4.11</b> – Resultados individuais e médios da tensão de ruptura ( $\tau_{rup}$ ) das juntas. ....	83
<b>Tabela 4.12</b> – Resultados da análise de variância (ANOVA) para a tensão de ruptura ( $\tau_{rup}$ ). ....	84
<b>Tabela 4.13</b> – Resultado do teste <i>post hoc</i> de Tukey para a tensão de ruptura ( $\tau_{rup}$ ): fatores isolados. ....	84
<b>Tabela 4.14</b> – Resultado do teste <i>post hoc</i> de Tukey para a tensão de ruptura ( $\tau_{rup}$ ): fator interação. ....	85
<b>Tabela 4.15</b> – Estatística descritiva e coeficientes de variação da tensão de ruptura ( $\tau_{rup}$ ) das juntas. ....	89
<b>Tabela 4.16</b> – Parâmetros de resistência ao cisalhamento das diferentes juntas. ....	91
<b>Tabela 4.17</b> – Valores normativos para a coesão e para o coeficiente de atrito de juntas de alvenarias. ....	93

<b>Tabela 4.18</b> – Parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos em diferentes estudos. ....	95
<b>Tabela A.1</b> – Tijolos de solo-cimento: análise FRX (%). .....	132
<b>Tabela A.2</b> – Tijolos de solo-cimento: análise dimensional.....	133
<b>Tabela A.3</b> – Tijolos de solo-cimento: ensaio de absorção de água. ....	134
<b>Tabela A.4</b> – Tijolos de solo-cimento: resistência à compressão. ....	134
<b>Tabela A.5</b> – Argamassa colante: análise FRX (%). .....	135
<b>Tabela A.6</b> – Argamassa colante: resistência à tração na flexão. ....	136
<b>Tabela A.7</b> – Argamassa colante: resistência à compressão. ....	136
<b>Tabela A.8</b> – Argamassa polimérica: análise FRX (%). .....	137

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 4.1</b> – Modos de falha dos prismas AC, conforme o nível de pré-compressão. ....	102
<b>Quadro 4.2</b> – Modos de falha dos prismas AP, conforme o nível de pré-compressão. ....	105
<b>Quadro 4.3</b> – Modos de falha dos prismas CA, conforme o nível de pré-compressão. ....	107
<b>Quadro A.1</b> – Tijolos de solo-cimento: análise DRX. ....	132
<b>Quadro A.2</b> – Argamassa colante: análise DRX. ....	135
<b>Quadro A.3</b> – Argamassa colante: dados do fabricante. ....	136
<b>Quadro A.4</b> – Argamassa polimérica: análise DRX. ....	138
<b>Quadro A.5</b> – Argamassa polimérica: espectroscopia por absorção no infravermelho. ....	139
<b>Quadro A.6</b> – Argamassa polimérica: dados do fabricante. ....	139
<b>Quadro A.7</b> – Cola acrílica: espectroscopia por absorção no infravermelho. ....	140
<b>Quadro A.8</b> – Cola acrílica: dados do fabricante. ....	141

## LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	–	Argamassa colante
ACI	–	American Concrete Institute
ANOVA	–	Análise de Variância ( <i>Analysis of Variance</i> )
AOI	–	Área de Interesse ( <i>Area of Interest</i> )
AP	–	Argamassa polimérica
AS	–	Australian Standard
ASCE	–	American Society of Civil Engineers
ASTM	–	American Society for Testing and Materials
BS	–	British Standard
BSI	–	British Standard Institute
$c$	–	Coesão
CV	–	Coefficiente de variação
CA	–	Cola acrílica
CEN	–	European Committee for Standardization
CPV-ARI	–	Cimento Portland – Alta Resistência Inicial
CSA	–	Canadian Standards Association
DIC	–	Correlação de Imagens Digitais ( <i>Digital Image Correlation</i> )
dp	–	Desvio-padrão
DRX	–	Difração de raios X
$E$	–	Módulo de Elasticidade
EM	–	European Norm
$F$	–	Força
FC	–	Fator de correção
FRX	–	Fluorescência de raios X
$G$	–	Módulo de cisalhamento

HSD	–	Diferença Mínima Significativa ( <i>Honest Significant Difference</i> )
LOI	–	Perda ao fogo ( <i>Loss on Ignition</i> )
MSJC	–	Masonry Standards Joint Committee
NBR	–	Norma Brasileira
P <sub>AC</sub>	–	Prisma de alvenaria assentado com argamassa colante
P <sub>AP</sub>	–	Prisma de alvenaria assentado com argamassa polimérica
P <sub>CA</sub>	–	Prisma de alvenaria assentado com cola acrílica
Q <sub>1</sub>	–	Primeiro quartil
Q <sub>2</sub>	–	Segundo quartil
Q <sub>3</sub>	–	Terceiro quartil
IQR	–	Intervalo interquartil ( <i>Interquartile Range</i> )
R <sup>2</sup>	–	Coefficiente de determinação
SA	–	Standards Australia
SE	–	Erro padrão ( <i>Standard Error</i> )
SIA	–	Swiss Society of Engineers and Architects
TMS	–	The Masonry Society
$\alpha$	–	Nível de significância
$\gamma$	–	Deformação por cisalhamento
$\varepsilon$	–	Deformação axial
$\sigma$	–	Tensão normal
$\tau$	–	Tensão de cisalhamento
tg( $\varphi$ )	–	Coefficiente de atrito

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>23</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	24
1.2 OBJETIVOS .....	25
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>26</b>
2.1 ALVENARIA: GENERALIDADES .....	26
2.2 TIJOLOS E ALVENARIAS DE SOLO-CIMENTO .....	28
2.3 PAPEL ESTRUTURAL DAS JUNTAS DA ALVENARIA .....	31
2.4 ALVENARIA DE JUNTAS FINAS .....	32
2.5 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ALVENARIAS .....	39
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>45</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	45
3.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.....	49
3.3 ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES.....	58
3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	62
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>65</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	65
4.1.1 Tijolos de solo-cimento.....	65
4.1.2 Argamassa colante .....	67
4.1.3 Argamassa polimérica.....	70
4.1.4 Cola acrílica.....	72
4.2 PRISMAS – COMPORTAMENTO MECÂNICO SOB CISALHAMENTO .....	72
4.2.1 Módulo de cisalhamento ( $G$ ).....	73
4.2.2 Deformação de ruptura por cisalhamento ( $\gamma_{rup}$ ).....	79
4.2.3 Tensão de ruptura por cisalhamento ( $\tau_{rup}$ ).....	83
4.2.4 Parâmetros de resistência ao cisalhamento .....	89
4.2.5 Modos de falha .....	100

<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>112</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE A – Resultados de análises e ensaios de caracterização dos materiais .....</b>	<b>132</b>
<b>APÊNDICE B – Curvas tensão-deformação das juntas, segundo o material de assentamento; análise de deformações por Correlação de Imagens Digitais (DIC) .....</b>	<b>142</b>
<b>APÊNDICE C – Padrão de falha dos prismas após ensaios de resistência ao cisalhamento .....</b>	<b>151</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, o setor da construção civil contribui significativamente para as alterações climáticas globais, sendo responsável por cerca de 21% das emissões globais de gases de efeito estufa. Somente em 2022, edifícios foram responsáveis por 34% da demanda global de energia e por 37% das emissões de dióxido de carbono (UNEP, 2024).

Diante deste cenário, torna-se imprescindível a adoção de práticas mais sustentáveis que resultem na otimização dos processos construtivos, em inovações tecnológicas e energéticas e no gerenciamento eficiente de recursos (Fernandes *et al.*, 2019; Leitão *et al.*, 2017). Neste contexto, o uso do solo como material de construção se destaca como uma importante alternativa para mitigar os passivos ambientais. A construção com este material é proeminente historicamente e nas últimas décadas, tem recuperado interesse global por ser uma opção mais sustentável, com uma baixa emissão de carbono (Hoff, 2016; Vyncke *et al.*, 2018).

Apesar do apelo sustentável, o uso de tijolos à base de solo (ou solo-cimento) ainda é restrito no âmbito estrutural, devido ao seu desempenho abaixo da média em termos de durabilidade, resistência à tração e resistência ao impacto, quando comparados aos tijolos cerâmicos convencionais (Sekhar; Nayak, 2018). A natureza das alvenarias compostas por tijolos de solo-cimento frequentemente se traduz em uma inadequação para resistir a cargas extremas associadas a riscos naturais, como ventos fortes e terremotos (Matta *et al.*, 2015).

Sob tais condições de carregamento lateral, a resistência da alvenaria ao cisalhamento desempenha um papel importante. Embora as paredes de alvenaria sejam capazes de transportar cargas verticais com segurança, a resposta ao cisalhamento é mais complexa, sendo crítica a aderência entre a argamassa e os tijolos (Yardim; Lalaj, 2016).

Com o avanço das técnicas construtivas sustentáveis, o foco recai sobre as alvenarias de juntas finas (que utilizam adesivos estruturais em camadas finas), um sistema que pode aumentar a resistência à compressão, mas cujas propriedades de cisalhamento requerem investigação específica.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A ruptura por cisalhamento é o modo dominante de falha das alvenarias submetidas a cargas laterais (vento, eventos sísmicos) ou impactos (Sharma *et al.*, 2016). Carregamentos no plano da estrutura podem dar origem a fissuras ao longo da diagonal da alvenaria ou ruptura ao longo das juntas horizontais (Lan *et al.*, 2020). Compreender o desempenho estrutural das alvenarias sob tensões de cisalhamento é imprescindível para o cálculo estático e dinâmico, uma vez que falhas podem ocorrer sob cargas laterais moderadas (Dhanasekar, 2011).

Verifica-se que a resistência da alvenaria ao cisalhamento é governada pela combinação de coesão e atrito, sendo este último aumentado por um componente proporcional à tensão de pré-compressão aplicada na direção normal às juntas (Hendry *et al.*, 2004). Contudo, enquanto a literatura é vasta em estudos de cisalhamento para alvenarias convencionais (cerâmica e concreto), persiste uma lacuna científica no que tange ao comportamento mecânico de alvenarias compostas por tijolos de solo-cimento assentadas com o sistema de juntas finas (Lan *et al.*, 2020). O comportamento mecânico dessas alvenarias — que utilizam diferentes adesivos estruturais e minimizam a espessura da junta — precisa ser detalhadamente examinado, já que elas exibem características distintas das alvenarias convencionais (Charai *et al.*, 2020).

O ponto mais vulnerável dessas estruturas reside na conexão entre o tijolo e o adesivo (Burlin *et al.*, 2020). A espessura da junta e a força de aderência são cruciais para a resistência aos carregamentos laterais (Singh; Munjal, 2017). Sabe-se que a redução da espessura das juntas geralmente aumenta a resistência à compressão e pode também aumentar a resistência à flexão e ao cisalhamento da alvenaria (Da Porto *et al.*, 2010). Contudo, é importante salientar que a redução excessiva das juntas pode gerar riscos construtivos, como a dificuldade de aplicação uniforme e a incapacidade de acomodar pequenas irregularidades nos tijolos. Tais fatores podem levar a falhas de preenchimento e à concentração de tensões, comprometendo a resistência de aderência efetiva (Thamboo *et al.*, 2011; Usman; Panwar, 2024).

Conforme o exposto, percebe-se a importância de avaliar o comportamento mecânico específico de alvenarias de solo-cimento e juntas finas quando submetidas a esforços de cisalhamento, sob diferentes níveis de pré-compressão. Para isso, o ensaio de prismas (triplets) de alvenaria, composto por um conjunto simplificado de tijolos e juntas, representa o modelo

ideal para capturar o comportamento real do sistema e determinar as propriedades da junta sob carregamento combinado (Nalon *et al.*, 2022).

## 1.2 OBJETIVOS

O presente estudo teve como objetivo principal investigar o impacto de diferentes materiais de assentamento — argamassa colante (AC), argamassa polimérica (AP) e cola acrílica (CA) — aplicados em camadas finas, na resistência ao cisalhamento de prismas de alvenaria construídos por tijolos de solo-cimento. Para tal foram avaliados:

- os efeitos dos diferentes materiais de assentamento sobre o comportamento mecânico dos prismas de alvenaria, quando submetidos a tensões de cisalhamento;
- a influência de diferentes níveis de tensões de pré-compressão sobre a resistência ao cisalhamento dos prismas;
- a influência dos mecanismos de aderência entre os materiais de ligação e os tijolos, sobre a relação tensão-deformação das diferentes juntas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o seguinte levantamento bibliográfico, buscou-se contextualizar o atual estado da arte referente às estruturas de alvenaria e de alvenarias compostas por tijolos de solo-cimento. Limitou-se a seleção das principais referências a um intervalo de dez anos de publicação, com exceção de trabalhos relevantes para a fundamentação teórica do tema. Assim, são apresentados a seguir as características gerais das alvenarias, dos tijolos e alvenarias de solo-cimento, dos tipos de juntas de assentamento e sua influência sobre o comportamento mecânico das alvenarias, quando submetidas a esforços de cisalhamento.

### 2.1 ALVENARIA: GENERALIDADES

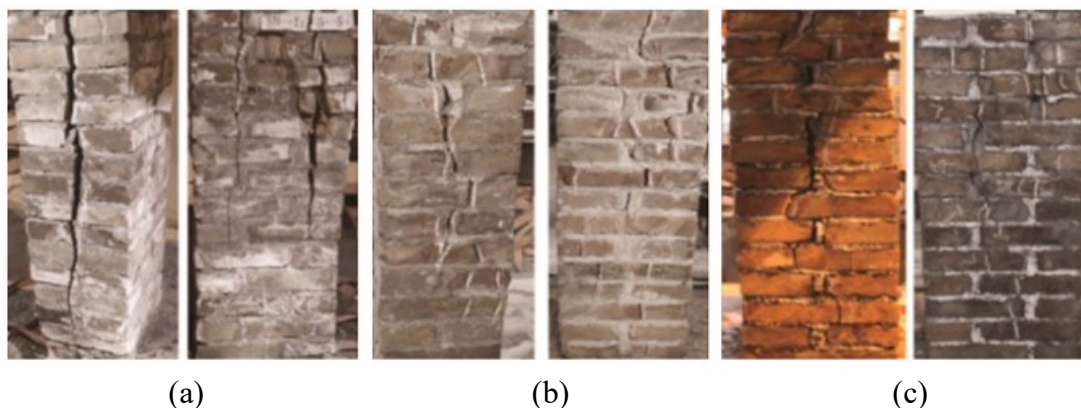
Alvenarias são estruturas constituídas por dois materiais: tijolos (ou blocos) e argamassa. A ligação interfacial entre esses materiais é essencial para que a alvenaria se comporte como uma entidade estrutural, cuja resistência à tensão compressiva é o fator predominante em projeto (Hendry, 2004; Reddy, 2022). Sob compressão vertical, a alvenaria estará submetida a tensões e deslocamentos diferentes daqueles experimentados por tijolos e argamassa individualmente, devido às diferentes características de deformação dos dois materiais sob compressão (Reddy, 2022).

Sabe-se que os modos de falha das alvenarias sob compressão uniforme se dão pelo desenvolvimento de fissuras paralelas ao eixo de carregamento ou por uma espécie de ruptura por cisalhamento ao longo de planos de baixa resistência, sendo este modo de falha dependente da resistência da argamassa em relação aos tijolos. Observa-se também que a resistência da alvenaria à compressão é menor que a resistência nominal à compressão dos tijolos testados individualmente. Por outro lado, a resistência da alvenaria pode exceder a resistência ao esmagamento da argamassa nela usada (Hendry *et al.*, 2004).

Liang *et al.* (2023) avaliaram o comportamento mecânico de pilares de alvenaria construídos com diferentes tipos de argamassas e submetidos a esforços de compressão. Conforme os resultados, a argamassa rege o processo de ruptura dos pilares de alvenaria. Os modelos de falha demonstraram que a principal causa da ruptura das amostras, construídas com argamassa cimentícia, argamassa de argila branca ou argamassa de escória, foi a fissuração por tração no

pilar de alvenaria, que se propagou pela junta de argamassa, produzindo ruptura por fissuração nas juntas da alvenaria (Figura 2.1).

**Figura 2.1** – Padrão de falha das amostras: (a) argamassa de cimento e areia; (b) argamassa de argila e areia; (c) argamassa de escória e areia.



**Fonte:** Liang *et al.* (2023).

Tais observações levam à conclusão de que a interação entre a argamassa e as unidades é a responsável pela ruptura da alvenaria. Segundo Paulino e Toralles (2024), embora os tijolos sejam os principais responsáveis por resistir às cargas compressivas, é a argamassa que garante a transmissão da carga e proporciona aderência entre as unidades. Assim, a seleção dos tijolos não deve basear-se apenas na sua resistência à compressão, mas também na sua compatibilidade com a argamassa (Paulino; Toralles, 2024).

A resistência da alvenaria às tensões de tração ou cisalhamento depende da ligação entre a argamassa e as unidades de alvenaria (Mahesh *et al.*, 2023). O mecanismo dessa ligação é complexo e ainda não é completamente compreendido. Sabe-se, no entanto, que na interface entre tijolo e argamassa ocorre uma interação de natureza mecânica sendo que, com outros materiais, também pode haver ligação química (Christy *et al.*, 2018; Hendry, 1998). As argamassas mistas, como as argamassas de cimento, cal e areia, são as mais utilizadas para o assentamento de alvenarias, no entanto, essas argamassas usualmente exibem maior resistência e rigidez do que os tijolos, o que resulta em uma baixa aderência entre as unidades (Reddy, 2022).

As características das superfícies das unidades de alvenaria, a porosidade, o teor de umidade da unidade no momento da construção, a composição da argamassa e a capacidade de absorção de água pelos tijolos são alguns dos fatores que influenciam a ligação tijolo-argamassa (Groot

1993; Reddy, 2022). A utilização de tijolos secos, com alta capacidade de sucção de água, pode resultar na formação de uma zona parcialmente hidratada na pasta de cimento, com baixa resistência mecânica (Hendry, 1998).

A má aderência entre tijolos e argamassa é causa de fissuras e deslizamentos ao longo das interfaces sob cargas laterais. Uma vez que o mecanismo de resistência ao cisalhamento das alvenarias se baseia no atrito existente nessa interface, sua capacidade de transferência de carga lateral no plano é muito baixa (Hwang *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2024). Isto pode resultar em falha frágil das estruturas devido a fissuras diagonais severas (Hwang *et al.*, 2022; Proença *et al.*, 2019). A grande variabilidade na resistência da alvenaria, causada pelas juntas verticais e horizontais, sob esforços de cisalhamento, pode ser minimizada pelo uso de argamassas de maior aderência, que permitem reduzir a espessura das juntas, formando a chamada alvenaria de juntas finas (Nazir; Dhanasekar, 2013; Sipp *et al.*, 2021).

O aumento da aderência, assim como a redução da espessura das juntas, contribui positivamente para o desempenho estrutural das alvenarias de juntas finas em relação às alvenarias convencionais. A incompatibilidade de deformação por cisalhamento entre os tijolos e a argamassa pode ser eliminada pelo aumento da aderência entre esses elementos, o que por sua vez pode eliminar a falha por tração ou por cisalhamento nas juntas da alvenaria (Nazir; Dhanasekar, 2013).

## 2.2 TIJOLOS E ALVENARIAS DE SOLO-CIMENTO

Segundo uma perspectiva técnica, a construção com terra pode ser separada em quatro categorias principais: pau-a-pique, *cob*, alvenaria com adobe (tijolos de barro) e terra batida. Os blocos ou tijolos de solo compactado foram a principal adição no período contemporâneo (van Damme; Houben, 2018; Vyncke *et al.*, 2018). Na produção de tijolos de solo compactado, a adição de areia ou a mistura de dois solos diferentes, com o fim de modificar a granulometria ou diminuir os teores de argila não estabilizada presente no material é denominada estabilização física (Houben; Guillaud, 1992). O solo também pode ser quimicamente estabilizado por meio de aditivos, como aglomerantes hidráulicos, aglomerantes aéreos ou por aditivos biológicos. O produto é então densificado ou estabilizado mecanicamente através do processo de compactação (Deboucha; Hashim, 2010; Houben; Guillaud, 1992; Reddy, 2020; Saidi *et al.*,

2018). Devido a sua alta resistência, menor absorção de água e boas propriedades ligantes, o cimento é o material estabilizante mais utilizado (Elahi *et al.*, 2020; Riza *et al.*, 2010).

A NBR 8491 (ABNT, 2012, p. 1) define o tijolo de solo-cimento como um “componente de alvenaria constituído de uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland, água...cujas altura (H) seja menor que sua largura (L). Pode ser maciço ou vazado.” Na produção de tijolos de solo-cimento, após a adição de água a mistura é comprimida mecanicamente em formas e os tijolos são curados por um período de aproximadamente 28 dias (Sitton *et al.*, 2018). Além do agente estabilizante, o comportamento final de um tijolo de terra depende das propriedades do solo, que variam muito de local para local (Malkanthi; Perera, 2019; Romero *et al.*, 2021). O cimento presente na mistura estabiliza a terra ao criar uma rede de silicato de cálcio hidratado (CSH). Um maior teor de cimento, junto a um adequado teor de água, resulta em uma rede CSH mais densa, aumentando a resistência dos tijolos à compressão (Kuma *et al.*, 2020).

Os tijolos de solo compactado apresentam inúmeras vantagens em comparação com outros materiais. Ao utilizar materiais locais em sua produção, esses tijolos reduzem os custos com transporte. Além da economia, os tijolos de solo compactado possibilitam construções mais rápidas, contribuem para uma baixa emissão de carbono e demandam menor incorporação de energia na fase de produção. Outro benefício da utilização desse material é a geração de baixos níveis de resíduos ao longo de todo o seu ciclo de vida. Os tijolos de solo também exibem propriedades higroscópicas, criando ambientes e interiores mais saudáveis para seus ocupantes (Hoff, 2016; Riza *et al.*, 2010; Waziri *et al.*, 2013).

Um contraste marcante entre os tijolos de solo-cimento e os tijolos convencionais é a energia consumida e a emissão de carbono durante o processo de produção. Enquanto 22 kg de CO<sub>2</sub> são gerados na produção de uma tonelada de tijolos de solo-cimento, blocos de concreto, tijolos cerâmicos e blocos de concreto aerado geram aproximadamente 143 kg de CO<sub>2</sub>/t, 200 kg de CO<sub>2</sub>/t e de 280 a 375 kg de CO<sub>2</sub>/t, respectivamente. Em média, tijolos de solo-cimento consomem menos de 10% da energia usada para fabricar unidades semelhantes de cerâmica e concreto (Waziri *et al.*, 2013).

De modo geral, a resistência e a rigidez das estruturas de alvenaria estão diretamente relacionadas com as propriedades de seus componentes e a complexa interação entre eles. As

propriedades mecânicas dos componentes, a espessura das juntas de argamassa, a geometria dos tijolos e o método de assentamento são alguns dos fatores que afetam a resistência, a deformabilidade e o modo de falha da alvenaria (Nalon *et al.*, 2020). Assim como as alvenarias convencionais, as alvenarias de solo-cimento são constituídas por tijolos e argamassa. A resistência da ligação entre os elementos da alvenaria é influenciada pela textura da superfície do tijolo, pela composição da argamassa e pela taxa de absorção de água e o teor de umidade do tijolo durante a construção (Christy *et al.*, 2018; Groot; Larbi, 1999; Singh; Munjal, 2017).

No caso de alvenarias de tijolos de solo, o teor de umidade dos tijolos no momento do assentamento desempenha um papel importante: tanto os tijolos muito secos como os totalmente saturados levam a uma baixa resistência das juntas (Hendry *et al.*, 2004). A absorção de água pelo tijolo controla o grau de hidratação da argamassa e a quantidade de produtos de hidratação que serão transportados e depositado nos poros da alvenaria. Tijolos secos e baixa consistência da argamassa resultam em um vínculo fraco (Maheri *et al.*, 2011). Segundo Reddy (2022), o teor ideal de umidade dos tijolos durante o assentamento da alvenaria é aproximadamente 75% do seu valor de saturação. Thamboo e Dhanasekar (2015) relataram aumento da resistência à flexão e ao cisalhamento de amostras de alvenarias curadas a seco, em comparação com amostras curadas por via úmida.

Uma grande quantidade de estudos pode ser encontrada a respeito da durabilidade (Bezerra; Azeredo, 2019; Mahdad *et al.*, 2018; Medvey; Dobszay, 2020; Mohammed *et al.*, 2025; Nina *et al.*, 2023; Panagiotou *et al.*, 2021; Rempel; Rempel, 2019; Wiehle *et al.*, 2022) e do comportamento mecânico de tijolos de terra (Aranda-Jiménez, 2023; Bailly *et al.*, 2024; González-López, 2018; Lan *et al.*, 2021; Ruiz *et al.*, 2018; Sitton *et al.*, 2018; Teixeira *et al.*, 2020; Youganathan *et al.*, 2019).

Encontra-se também vasta literatura a respeito da resistência de alvenarias de terra submetidas a esforços de compressão (Lan *et al.*, 2020; Lan *et al.*, 2021; Müller *et al.*, 2016; Murthy; Pandurangan, 2019; Sajanthan *et al.*, 2019; Saliba *et al.*, 2023; Tripura; Kasinikota, 2023; Wiehle; Brinkmann, 2022). No entanto, ainda se observa relativa escassez de trabalhos a respeito dos modos de falha e da resistência ao cisalhamento de alvenarias de solo-cimento submetidas a carregamentos no plano da estrutura (Cassese *et al.*, 2021; Tennant *et al.*, 2016).

### 2.3 PAPEL ESTRUTURAL DAS JUNTAS DA ALVENARIA

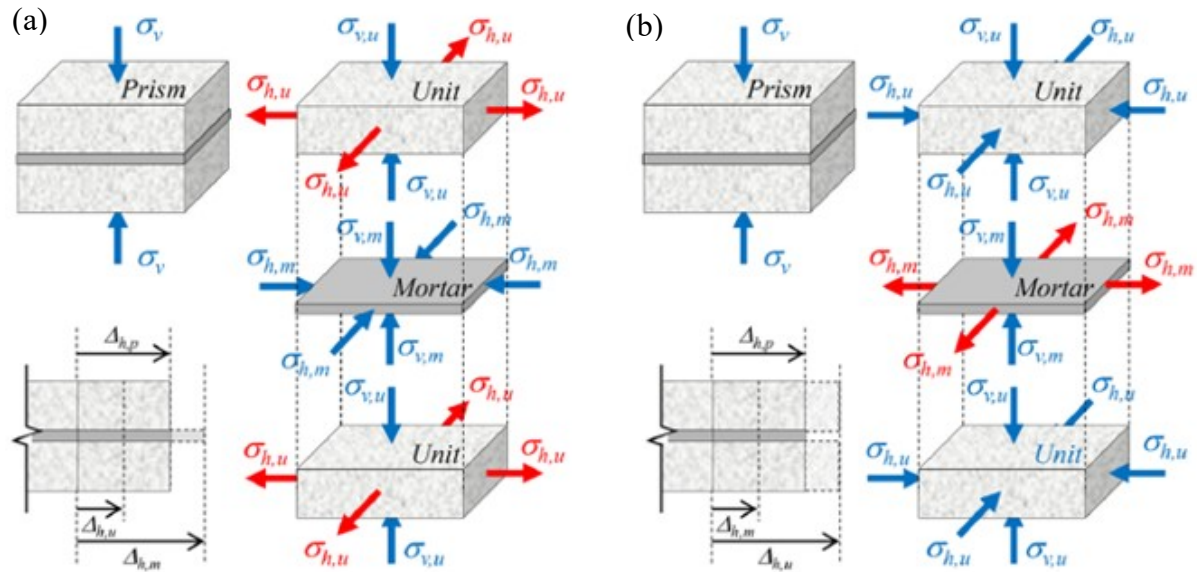
As argamassas são adesivos utilizados entre as unidades de alvenaria, formando juntas horizontais e verticais. Estas são as partes mais importantes da alvenaria, uma vez que conferem integridade à estrutura, definindo seu modo dominante de ruptura (Mohamad *et al.*, 2017; Sarhosis *et al.*, 2015). As maiores variações no comportamento da alvenaria são observadas nas juntas de argamassa, devido a descontinuidade de materiais nas interfaces unidade-argamassa. Assim, os modelos constitutivos desses materiais desempenham um papel importante no comportamento de estruturas de alvenaria sob diversas condições de carregamento (Shadlou *et al.*, 2020).

A incompatibilidade inicial das propriedades elásticas dos tijolos e da argamassa é uma questão fundamental no mecanismo de falha de prismas de alvenaria. Assumindo-se uma condição isotrópica, os módulos elásticos em conjunto com os coeficientes de Poisson dos dois materiais governam o efeito da compressão axial sobre as deformações laterais no plano e fora do plano da alvenaria. Se as interfaces entre a argamassa e o tijolo pudesse escorregar livremente, os dois materiais se deformariam lateralmente segundo diferentes valores. Caso contrário, a incompatibilidade entre as deformações laterais resulta em atrito entre as unidades e a argamassa, impedindo a livre expansão lateral dos materiais (Blackard *et al.*, 2007).

Segundo Nalon *et al.* (2022), em prismas não rejuntados produzidos com unidades mais rígidas que a argamassa e submetidas à compressão axial, a argamassa tende a apresentar uma deformação lateral maior que a deformação lateral das unidades (Figura 2.2 (a)). Conseqüentemente, a argamassa estará submetida a tensões de compressão verticais e laterais que mobilizam sua resistência sob condições multiaxiais de confinamento, enquanto as unidades estarão submetidas a tensões de compressão verticais e tensões de tração laterais.

Em situações em que a resistência à compressão triaxial da argamassa é maior do que a resistência à tração das unidades, o modelo de falha predominante dos prismas se dá pela fissuração vertical das unidades. Já em casos em que a resistência à tração das unidades é maior do que a resistência à compressão da argamassa, observa-se falha pelo esmagamento da argamassa (Mohamad *et al.*, 2017 apud Nalon *et al.*, 2022).

**Figura 2.2** – Estados de tensão em (a) prismas produzidos com unidades mais rígidas que a argamassa e sob uma tensão de compressão  $\sigma_v$ ; (b) prismas produzidos com unidades menos rígidas que a argamassa e sob uma tensão de compressão  $\sigma_v$ .



Fonte: adaptado de Nalon *et al.* (2022).

A restrição a esses movimentos diferenciais se deve à aderência entre argamassa e unidade, sendo a expansão lateral real um valor intermediário entre as deformações de cada material. Em alvenarias de argamassa mais rígida que as unidades, a deformação lateral das unidades tende a ser maior que a da argamassa. Desse modo, as unidades estarão sob compressão triaxial e a argamassa estará sob tensões de compressão verticais e tensões de tração laterais (Figura 2.2 (b)). Nesses casos, observa-se uma falha frágil dos prismas, com esmagamento das unidades sob tensões de compressão (Nalon *et al.*, 2022).

## 2.4 ALVENARIA DE JUNTAS FINAS

A espessura das juntas de argamassa em paredes de alvenaria convencionais é regulamentada por diversos códigos normativos mundialmente. A norma suíça SIA 266 (SIA, 2015) e a norma europeia EN 1996-1-1 (BSI, 2005), estabelecem intervalos de valores permitidos. A norma americana ACI 530-08/ASCE5-08/TMS402-08 (MSJC, 2008) e a norma australiana de alvenaria estrutural AS 3700 (SA, 2018) especificam um valor padrão. O código canadense de alvenaria estrutural CAN/CSA-A371:14 (CSA, 2024) também apresenta disposições semelhantes.

A Tabela 2.1 apresenta a espessura das juntas definida em diferentes normas e suas respectivas tolerâncias. A espessura padrão de 10 mm é a mais utilizada na prática. Segundo Mojsilovic e Stewart (2015), a adoção de valores padrão geralmente se baseia em fatores práticos e históricos, em vez de derivar de cálculos e considerações de engenharia.

**Tabela 2.1** – Espessura de juntas de alvenaria – Especificações.

Norma	Unidades	Argamassa	Espessura da junta (mm)	Tolerâncias (mm)	
				Junta horizontal	Junta vertical
SIA 266	Tijolos cerâmicos/concreto	Uso geral (cimento, cal, areia)	8-12	—	—
EN 1996-1-1	Tijolos cerâmicos/concreto/pedras naturais e artificiais	Uso geral (cimento, cal, areia)	6-15	—	—
ACI 530-08/ ASCE 5-08/TMS 402-08	Tijolos cerâmicos/concreto	Uso geral (cimento, cal, areia)	9,5	±3,2	-6,4/+9,5
AS 3700	Tijolos cerâmicos/concreto/silicato de cálcio/pedras naturais	Uso geral (cimento, cal, areia)	10	±3	±3
A 371-14	Tijolos cerâmicos/concreto	Uso geral (cimento, cal, areia)	≤10	±3	±3
NBR 16868-2	Tijolos cerâmicos/concreto	Uso geral (cimento, cal, areia)	10	±3	±3

A norma brasileira NBR 16868-2 (ABNT, 2020) estabelece que alvenarias convencionais devem ser executadas com juntas de assentamento de  $10 \pm 3$  mm de espessura, com argamassa de cimento, cal e areia. No entanto, essas dimensões podem resultar em grande variabilidade no comportamento mecânico da alvenaria, causada pelo acabamento, mais difícil de controlar em juntas de 10 mm. Em alvenarias de juntas finas, essa variabilidade tende a ser menor (Nazir; Dhanasekar, 2014).

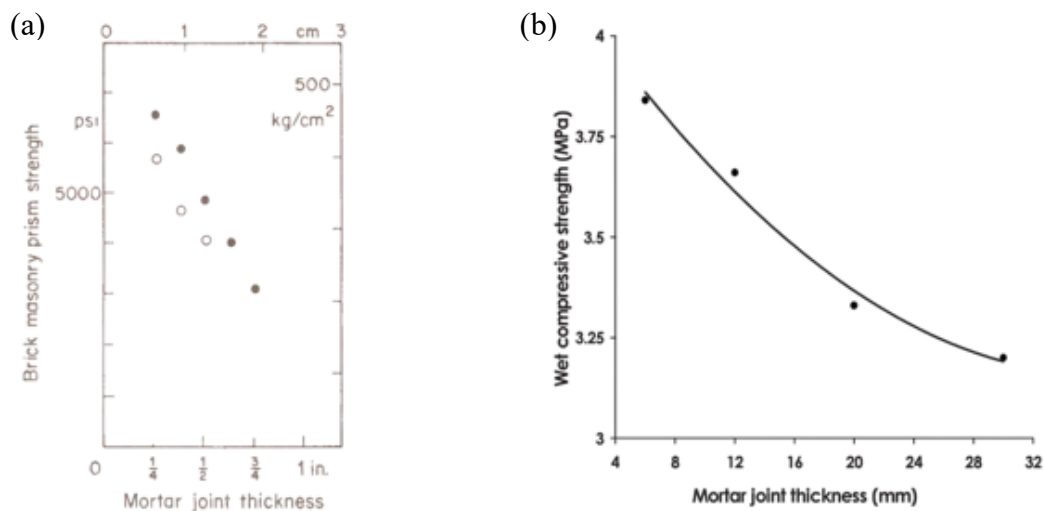
Assim, com o objetivo de aumentar a produtividade e a qualidade das alvenarias, por volta de 1996 surgiu na Europa a alvenaria de juntas finas (Thamboo *et al.*, 2011). A norma europeia BS EN 1996-1-1 (BSI, 2005), define como junta fina aquela cuja espessura está entre 0,5 mm e 3 mm. Conforme a norma australiana AS 3700 (SA, 2018) a espessura da junta fina deve estar entre 2 mm e 4 mm. Já a norma americana C1660-10 (ASTM, 2018) estabelece a utilização de

juntas com espessura entre 2 mm e 3 mm, para alvenarias de blocos celulares autoclavados de juntas finas.

O aumento da espessura das juntas tem sido associado a uma considerável diminuição da resistência da alvenaria, conforme relatado em diversos estudos (Francis, 1971; Hendry, 1998; Reddy *et al.*, 2009; Sahlin, 1971; Zahra; Dhanasekar, 2016). Como os esforços de tração, que geralmente provocam o colapso das unidades, se iniciam na interface de ligação entre elas, a qualidade do material de assentamento e a espessura das juntas de assentamento são de grande importância (Cavalcanti *et al.*, 2018).

Ao estudar a influência da espessura das juntas sobre a resistência à compressão de prismas de alvenaria, Sahlin (1971) relatou uma diminuição de 15% na resistência à compressão das amostras, para cada aumento de 3 mm na espessura das juntas, como mostra a Figura 2.3 (a).

**Figura 2.3** – Relação entre a espessura das juntas e a resistência a compressão.



Fontes: (a) Sahlin (1971); (b) Reddy *et al.* (2009).

Para tijolos de alta resistência, Hendry (1998) compilou e comparou resultados experimentais, indicando uma queda de 40% a 60% na resistência à compressão de prismas de alvenaria, com o aumento da espessura das juntas de 6 mm para 24 mm. Reddy *et al.* (2009) estudaram os efeitos da variação da espessura das juntas de prismas produzidos com tijolos de solo-cimento. Conforme os autores, a resistência à compressão dos prismas de alvenaria no estado saturado diminuiu em cerca de 16% com o aumento da espessura das juntas de argamassa de 6 mm para 30 mm (Figura 2.3 (b)).

Empregando princípios da mecânica do dano, Zahra e Dhanasekar (2016) formularam um método de modelagem para prever o comportamento à compressão da alvenaria. Os parâmetros de dano foram calibrados utilizando dados experimentais disponíveis para as propriedades dos constituintes da alvenaria. Foi estudada a sensibilidade dos principais parâmetros: resistência da unidade, resistência da argamassa, espessura da junta de argamassa e a relação entre a altura da unidade e a espessura da junta.

O modelo foi calibrado para diferentes taxas de confinamento da argamassa sob compressão triaxial, que aumenta gradualmente com a diminuição da espessura da junta, sendo utilizado para determinar a resistência à compressão de alvenarias com espessuras de juntas ( $t_j$ ) entre 10 mm e 2 mm, conforme a resistência média à compressão das unidades ( $f_{uc}$ ). Com a redução da espessura da camada de argamassa, um aumento gradual na resistência média da alvenaria à compressão ( $f_m$ ) pode ser observado (Tabela 2.2).

**Tabela 2.2** – Modelo de previsão da resistência à compressão com alteração da espessura da junta.

$f_{uc}$ (MPa)	$f_m$ ( $t_j$ -10 mm) (MPa)	$f_m$ ( $t_j$ -4 mm) (MPa)	$f_m$ ( $t_j$ -2 mm) (MPa)
10	5.3	6.1	7.0
15	7.1	8.4	9.6
20	9.8	11.2	12.7
25	12.0	14.1	15.9

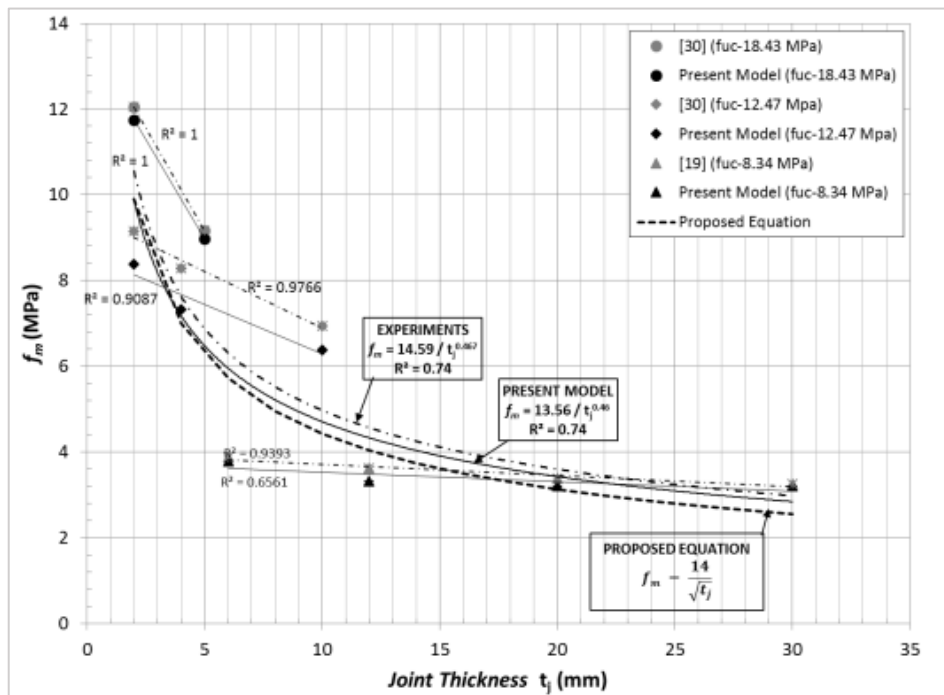
Fonte: Zahra e Dhanasekar (2016).

A comparação da previsão do modelo desenvolvido pelos autores, com dados experimentais de quarenta estudos realizados sobre a resistência à compressão de alvenarias com variação da espessura das juntas é apresentada na Figura 2.4.

É possível observar que as previsões do modelo estão muito próximas dos dados experimentais. Com base nessas regressões, foi proposta uma relação para representar o efeito da espessura da junta ( $t_j$ ) sobre a resistência média à compressão da alvenaria ( $f_m$ ) (Equação 2.1).

$$f_m = \frac{14}{\sqrt{t_j}} \quad (2.1)$$

**Figura 2.4** – Efeito da variação da espessura da junta de argamassa sobre a resistência à compressão da alvenaria.



Fonte: Zahra e Dhanasekar (2016).

Conforme concluído pelos autores, a maneira mais eficaz de aumentar a resistência da alvenaria é usar unidades de maior resistência com menor espessura de camada de argamassa (Zahra; Dhanasekar, 2016).

Segundo Walliman *et al.* (2008), somado ao aumento das resistências à flexão e ao cisalhamento, a redução da espessura das juntas da alvenaria diminui a necessidade de suporte estrutural, permitem a construção de paredes com formatos mais complexos e facilitam o transporte de painéis pré-fabricados. Marrochino *et al.* (2009) apontaram melhora considerável da resistência térmica da alvenaria com a aplicação de juntas finas, uma vez que o fluxo de calor através da alvenaria ocorre predominantemente através das juntas de argamassa.

Estruturalmente, a redução da espessura das juntas da alvenaria, com aplicação de camadas mais finas de argamassa (ou cola) tem efeitos benéficos, como aumento da resistência à compressão (Thambo *et al.*, 2011; Yao *et al.*, 2021). Além disso, o uso de argamassa com adição de polímeros, aumenta a resistência da alvenaria às cargas laterais. Conforme Raymundo *et al.* (2017), a utilização de argamassa polimérica facilita a organização do processo construtivo, aumenta a produtividade e diminui os erros de dosagem dos materiais.

A alvenaria de juntas finas é caracterizada pela utilização de argamassas do tipo colante (Sipp *et al.*, 2021). Segundo a NBR 14081-1 (ABNT, 2012) a argamassa colante é um material industrial composto por cimento Portland, agregados minerais e aditivos químicos. A mistura com água resulta em uma massa plástica com propriedades adesivas. Conforme as solicitações às quais estarão sujeitas no estado endurecido e seu local de aplicação, a norma classifica essas argamassas como ACI, ACII e ACIII. A argamassa do tipo ACIII possui maior teor de polímeros em sua composição, o que lhe confere maior capacidade de aderência em comparação às outras argamassas (Moreira, 2022).

De modo geral, as argamassas colantes possuem maior capacidade de distribuição das tensões presentes no sistema em que são aplicadas, devido à sua resistência de aderência à tração e ao cisalhamento, assim como à sua capacidade de deformação. Em estudo desenvolvido por Zappile e Rezende (2020), foi observado que, para um mesmo teor de cimento, o aumento no teor de polímeros da argamassa colante resulta em aumento da sua flexibilidade. Conforme Nogami *et al.* (2015), argamassas mais flexíveis resistem melhor ao cisalhamento devido à sua maior capacidade de deformação.

Apesar de sua ampla utilização, a argamassa à base de cimento apresenta algumas desvantagens consideráveis. Entre elas, destacam-se a sua alta rigidez, baixa resistência à tração e alto encolhimento após a secagem. Além disso, possui baixa resistência química, exige longos tempos de cura e gera um elevado impacto ambiental (Brito e Kurda, 2021; Nicolini *et al.*, 2022). A adição de diferentes tipos de polímeros tem sido uma das soluções propostas para melhorar o desempenho dessas argamassas e torná-las mais sustentáveis (Brien; Mahboub, 2013; Javohir; Zavkiddinjon, 2024; Susilorini *et al.*, 2014). A incorporação de polímeros à argamassa melhora diversas propriedades do material, como a aderência, a resistência mecânica, a resiliência, a impermeabilização e a resistência química (Aattache; Soltani, 2020; Florido *et al.*, 2024).

À medida que o polímero forma uma estrutura em rede na argamassa, ele preenche a maior parte dos poros internos do material, formando uma estrutura mais densa. Este processo aumenta a resistência das juntas da alvenaria à fissuração por retração e a sua durabilidade (Nicolini *et al.*, 2022; Thamboo *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2021). Embora a NBR 16590-1 (ABNT, 2017) estabeleça os critérios para o uso de compostos poliméricos não cimentícios

para assentamento de alvenarias de vedação, com juntas de espessura entre 1 mm e 6 mm, ainda não existe uma norma nacional que contemple e estabeleça requisitos para o uso de argamassas poliméricas no desenvolvimento de projetos de alvenarias de juntas finas (Florido *et al.*, 2024; Sipp *et al.*, 2021).

Os chamados adesivos estruturais também têm sido usados de forma esporádica, como alternativa às argamassas minerais na construção de alvenarias, especialmente em países europeus (Graubohm; Brameshuber, 2010). A tecnologia de adesivos está entre os setores de fabricação que mais crescem, impulsionada pela vasta diversidade de substratos e pelo contínuo desenvolvimento e introdução de novos processos e materiais. O emprego de adesivos para tecnologia de conexão oferece inúmeros benefícios. Além de ser econômico e rápido, permite uma distribuição homogênea de tensões entre as superfícies coladas (Marques *et al.*, 2020).

Um adesivo estrutural pode ser descrito como uma “cola de alta resistência” que une componentes em uma estrutura, resultando em maior resistência e rigidez (Adams; Wake, 1984). Dado que um adesivo estrutural é capaz de transmitir cargas de uma junta para outra de maneira uniforme, estes adesivos permitem a fabricação de estruturas mecanicamente equivalentes ou superiores aos conjuntos fixados de forma convencional. Os adesivos estruturais mais utilizados incluem epóxis, poliuretanos, acrílicos modificados, cianoacrilatos e fenólicos (Abbey; Zalucha, 2012; Buschow *et al.*, 2001). Esses adesivos podem apresentar resistência ao cisalhamento superior a 6 MPa (Möller; Matyjaszewski, 2012).

Um dos adesivos que vem sendo utilizado na confecção de alvenarias é a cola de poliuretano (PU), que permite a redução da espessura das juntas a praticamente zero. A construção com cola PU é mais rápida e vem ganhando popularidade na Europa devido a facilidade de construção e a eficiência térmica das paredes (Derkach, 2020; Dzhamev, 2023; Gams *et al.*, 2023). Ariffin *et al.* (2015); Li *et al.* (2021), Liu *et al.* (2024) relataram melhora do comportamento de alvenarias assentadas ou reforçadas com epóxi. As resinas do tipo epóxi são uma das principais resinas utilizadas na produção de concretos e argamassas modificados com polímeros. Dentre as vantagens que apresentam estão o aumento da trabalhabilidade e redução da segregação, aumento das resistências à compressão, à flexão e à tração, aumento da ductilidade e da resistência à erosão ácida, além de redução do encolhimento (Anagnostopoulos *et al.*, 2016; Dong *et al.*, 2024; Pang *et al.*, 2023).

Ferreira e Moreno Júnior (2011) conduziram um estudo comparativo sobre o comportamento de prismas de alvenaria sob compressão e flexão. Foi avaliada a viabilidade do uso de cola à base de poliacetato de vinila (PVA) no assentamento de paredes de alvenaria, como alternativa às argamassas tradicionais. Segundo os autores, os prismas construídos com cola PVA demonstraram resistência superior à compressão, quando comparados aos assentados com argamassa cimentícia ou de solo-cimento. Após 28 dias, prismas montados com três filetes de cola PVA alcançaram, em média, uma resistência à compressão 35% maior do que aqueles feitos com argamassa. Além disso, apresentaram o dobro da resistência à flexão em relação aos demais tipos de assentamento.

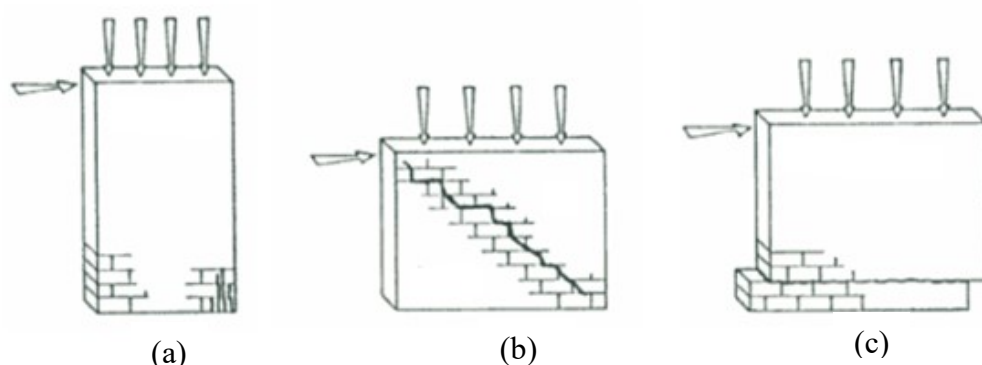
A viabilidade do emprego de cola PVA no assentamento e reforço de paredes de alvenaria, em substituição às argamassas usuais, também tem sido objeto de outros estudos recentes (Assis, 2024; Fan *et al.*, 2019; Florido *et al.*, 2024), o que indica o crescente interesse científico e técnico pelas propriedades e aplicações dos adesivos estruturais em estruturas de alvenaria.

## 2.5 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ALVENARIAS

De maneira geral, os modos de falha das alvenarias sujeitas a carregamentos no plano se dão por flexão, em que a resistência máxima à tração ou à compressão ao longo das seções transversais da parede é atingida, caracterizando-se por fissuras quase horizontais ou verticais, respectivamente; por cisalhamento diagonal, relacionada à resistência à tração da alvenaria ao longo da direção principal e caracterizada por fissuras diagonais ao longo da parede.

Este modo de falha ocorre geralmente em alvenarias irregulares ou em alvenarias regulares com argamassa forte e unidades fracas, com um bom comportamento de ligação nas juntas da alvenaria. Por fim, a alvenaria pode falhar por cisalhamento deslizante ao longo das juntas de argamassa, com surgimento de fissuras horizontais devido à baixa resistência de ligação na interface argamassa-tijolo ou em caso de valores reduzidos das tensões de compressão atuando na parede (Celano *et al.*, 2021). Os principais modos de falha das alvenarias são apresentados na Figura 2.5.

**Figura 2.5** – Modos de falha típicos de paredes de alvenaria, sujeitas a cargas no plano: (a) ruptura por flexão, com esmagamento do canto da alvenaria; (b) ruptura por cisalhamento diagonal; (c) ruptura por cisalhamento deslizante.



**Fonte:** adaptado de Garbin *et al.* (2007).

A falha por cisalhamento é o principal modo de falha das alvenarias sob carga horizontal. Incluindo-se a falha por fissura ao longo da diagonal e por cisalhamento ao longo da junta horizontal de argamassa. Assim, a resistência ao cisalhamento da alvenaria é um parâmetro importante para o cálculo estático e dinâmico desse tipo de estrutura (Lan *et al.*, 2020).

Em particular, o cisalhamento em alvenarias não reforçadas é resistido pela deformação nas juntas de argamassa, sendo bem definido pelo envelope de falha de Mohr-Coulomb, que relaciona a resistência ao cisalhamento ( $\tau$ ) à resistência de ligação ou coesão ( $c$ ), a um coeficiente de atrito interno ( $tg(\varphi)$ ) e à tensão perpendicular atuante na junta ( $\sigma$ ), conforme a Equação 2.2. Essa equação linear é geralmente aplicável a tensões de compressão de até 2 MPa (Dhanasekar, 2011; Lepakshi; Reddy, 2020).

$$\tau = c + \sigma tg(\varphi) \quad (2.2)$$

Os métodos de ensaio atualmente existentes para determinar a resistência ao cisalhamento da alvenaria podem ser divididos em três categorias:

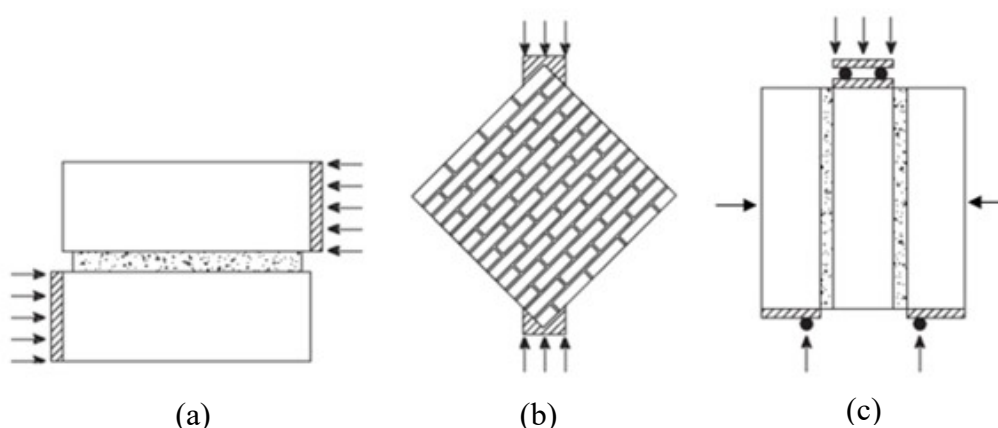
- teste de resistência ao cisalhamento pareado: embora seja de fácil operação, este teste permite que a superfície de cisalhamento das amostras seja afetada por momentos de flexão (Figura 2.6 (a));
- teste de compressão diagonal: neste teste o estado de tensão de cisalhamento puro na alvenaria é simulado aplicando-se compressão diagonal em uma parede quadrada (Figura 2.6 (b)).

Embora reflita bem o papel das juntas de argamassa verticais e horizontais na alvenaria, o tamanho dos espécimes pode ser um fator limitante para a realização do teste;

- teste de cisalhamento *triplet* ou triplo: desenvolvido com o fim de eliminar a influência de momentos de flexão nas superfícies de cisalhamento, este teste fornece a melhor configuração para a avaliação dos parâmetros de cisalhamento de paredes (Angiolilli; Gregori, 2020). Caracteriza-se pela utilização de prismas de alvenaria, de montagem simples, com altura de três unidades (Figura 2.6 (c)).

Testes experimentais de prismas são usados em pesquisas sobre a qualidade da alvenaria por serem modelos simplificados, fáceis de construir e de testar. Os espécimes podem representar o comportamento real da alvenaria, incluindo os efeitos das propriedades dos elementos constituintes e a qualidade de acabamento (Barattucci *et al.*, 2020; Bompa; Elghazouli, 2020; Lan *et al.*, 2020; Nalon *et al.*, 2022).

**Figura 2.6** – Métodos de ensaio de cisalhamento em alvenarias: (a) teste de cisalhamento pareado; (b) teste por compressão diagonal; (c) teste *triplet* ou triplo.



**Fonte:** adaptado de Lan *et al.* (2020).

Por ser uma estrutura composta e não homogênea, as propriedades mecânicas das alvenarias dependem da interação entre seus componentes (tijolos e argamassa), da sua relação de volume, das propriedades de ligação, da orientação das juntas de assentamento e do estado de tensão nas juntas (Bosiljkov *et al.*, 2005). Especialmente, a resistência das alvenarias sob carregamentos no plano da estrutura depende das resistências da argamassa, das unidades e de suas proporções. A falha por cisalhamento ocorrerá caso a magnitude das forças horizontais exceder a capacidade de resistência no plano da parede (Churilov; Dumova-Jovanoska, 2013).

Por meio de ensaios de compressão de prismas, Mohamad *et al.* (2017) demonstraram que a argamassa governa o processo de falha da alvenaria. Sob carga crescente, os componentes dos prismas construídos com argamassa de alta resistência começam a agir como um material homogêneo, sendo a principal causa de falha a fissuração por tração nos blocos, que se propaga pela junta de argamassa e produz fissuração localizada na interface de contato. Para os prismas construídos com argamassas de baixa resistência, a falha começa com o esmagamento da argamassa, que causa tensões de tração localizadas nos blocos. Segundos os autores, essas observações levam à conclusão de que a interação entre a argamassa e as unidades é a responsável pela falha das alvenarias.

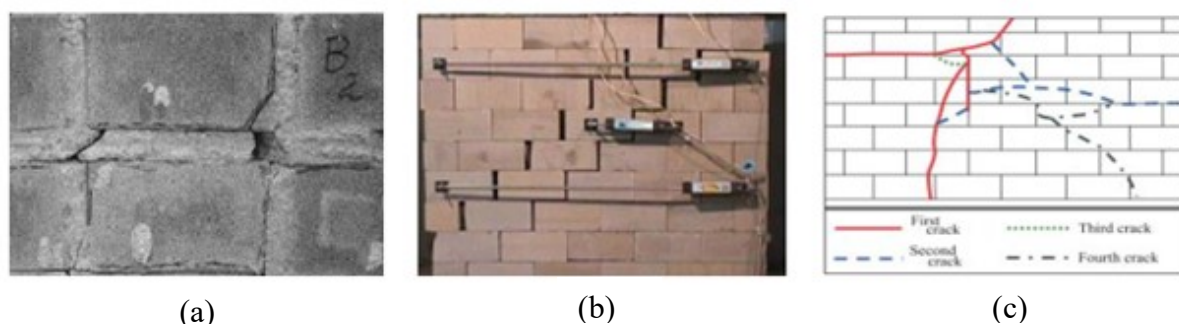
Alecci *et al.* (2013), investigaram a resistência ao cisalhamento de paredes de alvenaria submetidas ao teste de compressão diagonal e ao teste *triplet*. Conforme os autores, o ensaio de cisalhamento *triplet* permite adequada avaliação da aderência entre argamassa e tijolo e da resistência ao cisalhamento, apresentando como vantagens a simplicidade de execução e de interpretação dos dados. Destaca-se que os resultados experimentais obtidos usando ambos os tipos de ensaios evidenciam que os valores de resistência ao cisalhamento da alvenaria dependem particularmente do comportamento da argamassa.

Com o advento de materiais de ligação mais resistentes, tornou-se possível manter os benefícios e reduzir as desvantagens das juntas tradicionais de argamassa de 10 mm. Com os novos ligantes é possível reduzir a espessura da argamassa para até 1 mm, aumentando a resistência das alvenarias às cargas laterais (Gao *et al.*, 2023; Kanyeto; Fried, 2011; Laghi *et al.*, 2020). A redução da espessura das juntas modifica o modo de falha da alvenaria, aproximando-o do modo de falha de meios contínuos, sem localização excessiva do caminho de falha ao longo das juntas. Em teoria, isso significaria que a mecânica do contínuo que não explica adequadamente o comportamento da alvenaria convencional, poderia ser aplicada racionalmente para a análise e o projeto de sistemas de alvenaria de juntas finas, eliminando a concepção das juntas como planos de baixa resistência (Dhanasekar; Da Porto, 2009).

As juntas de argamassa convencionais de 10 mm falham devido a um mecanismo combinado envolvendo interface, argamassa e fissuras na unidade. Na alvenaria de juntas secas, a falha ocorre de modo diagonal e escalonado, segundo as interfaces e sem danos às unidades (Lin *et al.*, 2015). A falha da alvenaria de juntas finas exibe influência limitada das juntas (Figura 2.7). Assim, pode-se inferir que as interfaces têm efeito significativo sobre o modo de falha das

alvenarias convencionais e de juntas secas, levando à localização dos danos. A tecnologia de juntas finas, por outro lado, tem o potencial de modificar o modo de falha sem nenhuma localização óbvia, minimizando assim o efeito das juntas (Dhanasekar; Da Porto, 2009).

**Figura 2.7** – Modos de falha de alvenarias sob cisalhamento: (a) juntas tradicionais (10 mm); (b) juntas secas (0 mm); (c) juntas finas (2 mm).



**Fonte:** Dhanasekar; Da Porto (2009).

Thamboo *et al.* (2013), estudaram a resistência de ligação entre argamassa e blocos de concreto, em alvenarias assentadas com argamassa polimérica, em camadas de 2 mm de espessura. Espécimes de vigas foram testados sob flexão de quatro pontos e prismas *triplet* foram testados sob cisalhamento, conforme a norma BS EN 1052-3 (BSI, 2002). De acordo com os autores, as argamassas poliméricas usadas em alvenarias de juntas finas melhoram a resistência de ligação da alvenaria.

As argamassas com adição de polímeros exibiram valores de resistência à tração na flexão maiores que 50% de sua resistência à compressão. A adição de apenas 2% de polímeros na mistura de argamassa pode ser considerada eficaz. Os valores da resistência de ligação à flexão e ao cisalhamento das alvenarias de juntas finas, assentadas com argamassa polimérica foram aproximadamente o dobro dos valores exibidos pelas alvenarias convencionais. Além disso, o aumento do teor de polímeros na argamassa tornou a falha por flexão menos quebradiça, apontando para uma melhora nas características de deformação das juntas de ligação (Thamboo, 2013).

Assis (2024) estudou o comportamento mecânico de prismas de tijolos de solo-cimento, assentados com diferentes materiais: argamassa colante, argamassa de assentamento convencional e cola PVA. Sob compressão, os prismas produzidos com argamassa colante exibiram deformações semelhantes para tensões de até 1 MPa. Segundo a autora, é possível que

este tipo de junta tenha permitido uma melhor distribuição dos esforços, uma vez que a argamassa colante contém areia fina, cimento e polímeros em sua composição, o que tende a melhorar a aderência aos tijolos, além de permitir maior deformabilidade.

Enquanto nas amostras produzidas com cola PVA e argamassa convencional as primeiras fissuras sob compressão surgiram sob 30% e 50% da carga de ruptura, respectivamente, para os prismas assentados com argamassa colante, as primeiras fissuras surgiram sob cerca de 60% da carga de ruptura. O fator de eficiência, dado pela razão entre a resistência do prisma e a resistência do tijolo evidenciou a influência exercida pelo tipo de material de assentamento sobre o comportamento mecânico das alvenarias e o desempenho superior da argamassa colante. Enquanto o fator de eficiência para as amostras produzidas com cola PVA foi de 0,27 e com argamassa convencional foi de 0,41, as amostras produzidas com argamassa colante apresentaram fator de eficiência igual a 0,47 (Assis, 2024).

Embora seja reconhecido que a argamassa é responsável por induzir fissuras nas unidades de alvenaria paralelas à direção da compressão, devido a deslocamentos incompatíveis na interface, a melhora da qualidade das juntas, com aumento da aderência, pode eliminar a incompatibilidade da deformação por cisalhamento entre as unidades e a argamassa (Sarangapani *et al.*, 2005). Os efeitos da espessura das juntas de argamassa sob compressão são bem conhecidos, entretanto, seu efeito no comportamento das alvenarias sob flexão e cisalhamento é menos compreendido, havendo escassez de estudos correlatos na literatura (Dhanasekar; Da Porto, 2009; Thamboo *et al.*, 2013).

### 3 METODOLOGIA

O programa experimental da presente pesquisa teve como objetivo avaliar a resistência ao cisalhamento de prismas de alvenaria compostos por tijolos de solo-cimento e assentados com três tipos distintos de materiais colantes, nomeadamente argamassa colante, argamassa polimérica e cola acrílica.

Após a realização dos ensaios de caracterização dos materiais, os prismas de alvenaria foram confeccionados e testados sob três níveis de tensões de pré-compressão. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram então calculados em conformidade com a norma adotada para a realização dos testes.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A composição química elementar dos tijolos e das argamassas colante e polimérica foi determinada por meio de análise de fluorescência de raios X (FRX). Para determinação do teor de compostos voláteis presentes nas amostras, foi realizado o ensaio de perda ao fogo, segundo as recomendações da norma NBR 17086-6 (ABNT, 2023). Para identificar as fases cristalinas (minerais ou compostos) presentes nos tijolos e nas argamassas colante e polimérica foi realizada a análise de difração de raios X (DRX).

Conforme as diretrizes da NBR 8492 (ABNT, 2012), os tijolos de solo-cimento foram caracterizados por meio de análise dimensional, ensaio de absorção de água e resistência à compressão simples. A análise dimensional foi conduzida em uma amostra representativa de 10 tijolos, utilizando-se um paquímetro como instrumento de medição. As dimensões aferidas incluíram o comprimento, altura, largura e diâmetro dos furos. Para cada uma dessas dimensões, foram realizadas três medições distintas em pontos variados da face do tijolo. As médias obtidas para cada dimensão foram subsequentemente comparadas com os requisitos mínimos de dimensão estipulados pela norma NBR 8492 (ABNT, 2012), visando verificar a conformidade do material.

Para o ensaio de absorção de água dos tijolos três amostras foram submetidas a secagem em estufa sob temperatura controlada entre 105 °C e 110 °C, até atingirem massa constante. Após o resfriamento as amostras foram pesadas para a determinação da massa seca ( $m_l$ ).

Subsequentemente, as amostras foram imersas em água por um período de 24 horas. Ao término desse período e após a secagem da superfície das amostras com um pano úmido, estas foram novamente pesadas, registrando-se a massa dos tijolos saturado ( $m_2$ ). A taxa de absorção de água dos tijolos foi então determinada por meio da Equação 3.1.

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (3.1)$$

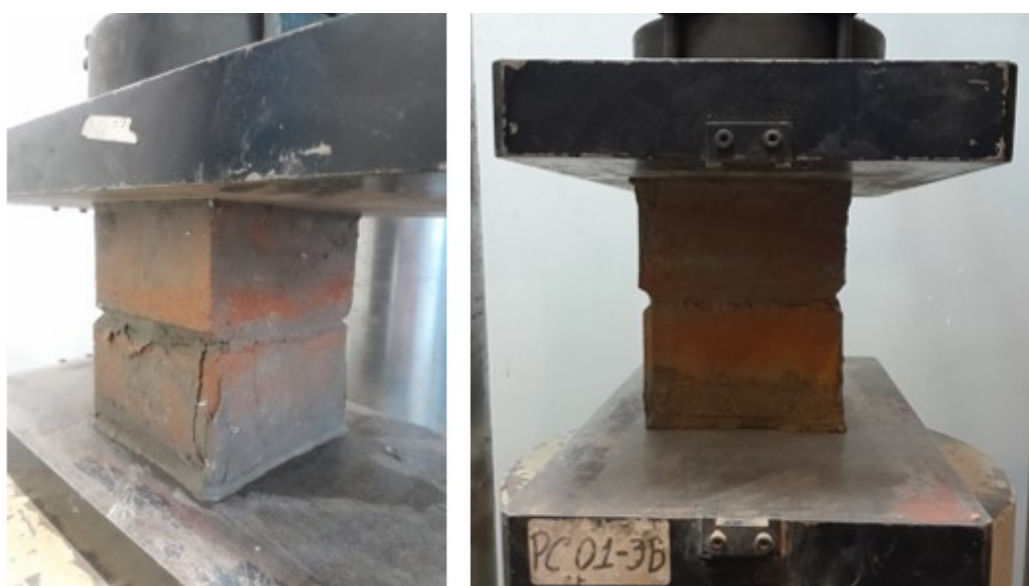
Em que:  $A$  = taxa de absorção de água (%);

$m_1$  = massa do corpo de prova seco em estufa (g);

$m_2$  = massa do corpo de prova saturado (g).

Em conformidade com a NBR 8492 (ABNT, 2012), para a execução do ensaio de compressão simples, os tijolos foram seccionados ao meio e tiveram suas metades sobrepostas e unidas por uma fina camada de pasta de cimento Portland. Para assegurar o contato planar e uniforme entre as superfícies de aplicação de carga, realizou-se o capeamento dos espécimes utilizando a mesma pasta de cimento empregada na união. Os ensaios foram executados em uma prensa universal EMIC PC 200 I, aplicando-se carga de forma gradativa a uma taxa constante de 500 N/s até a ocorrência da ruptura (Figura 3.1).

**Figura 3.1** – Ensaio de resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento.



A fim de analisar a influência do tempo de cura e do tipo de cimento usado sobre a resistência à compressão dos espécimes, sete amostras foram confeccionadas com cimento CPIII e foram submetidas ao ensaio de compressão simples após 28 dias (Grupo A). Outras sete amostras de tijolos foram confeccionadas com pasta de cimento CPV-ARI e ensaiadas após 120 dias de cura (Grupo B). Os valores individuais de resistência à compressão foram calculados dividindo-se a carga máxima registrada durante o ensaio pela área da face de trabalho do espécime, conforme a Equação 3.2.

$$f_t = \frac{F}{S} \quad (3.2)$$

Em que:  $f_t$  = resistência à compressão simples (MPa);

$F$  = carga de ruptura do corpo de prova (N);

$S$  = área de aplicação da carga (mm<sup>2</sup>).

A argamassa colante do tipo ACIII, preparada conforme a NBR 16541 (ABNT, 2016), foi caracterizada quanto à resistência à tração na flexão e à compressão em conformidade com a NBR 13279 (ABNT, 2005) após 7, 14 e 28 dias de cura. Para o ensaio de tração na flexão, foram confeccionados três corpos de prova prismáticos com dimensões de 4 cm × 4 cm × 16 cm. As amostras foram ensaiadas em uma prensa universal EMIC DL 3000, sob uma carga de 50 ± 10 N/s, aplicada até a ruptura das amostras (Figura 3.2 (a)). A resistência à tração na flexão foi então calculada conforme a Equação 3.3.

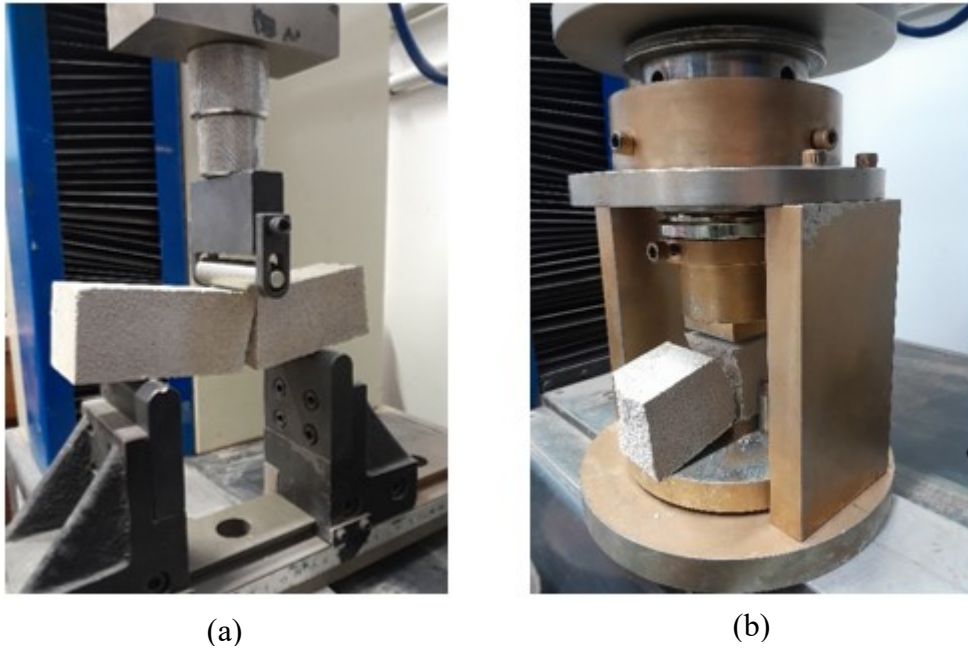
$$R_f = \frac{1,5F_f L}{40^3} \quad (3.3)$$

Em que:  $R_f$  = resistência à tração na flexão (MPa);

$F_f$  = carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

$L$  = distância entre os suportes (mm).

**Figura 3.2** – Ensaios mecânicos de caracterização da argamassa colante: (a) resistência à tração na flexão; (b) resistência à compressão.



Subsequentemente, as metades dos corpos de prova ensaiados sob flexão foram ensaiadas à compressão sob carga de  $500 \pm 50$  N/s até a ruptura (Figura 3.2 (b)). A resistência à compressão foi calculada segundo a Equação 3.4.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.4)$$

Em que:  $R_c$  = resistência à compressão (MPa);

$F_c$  = carga máxima aplicada (N);

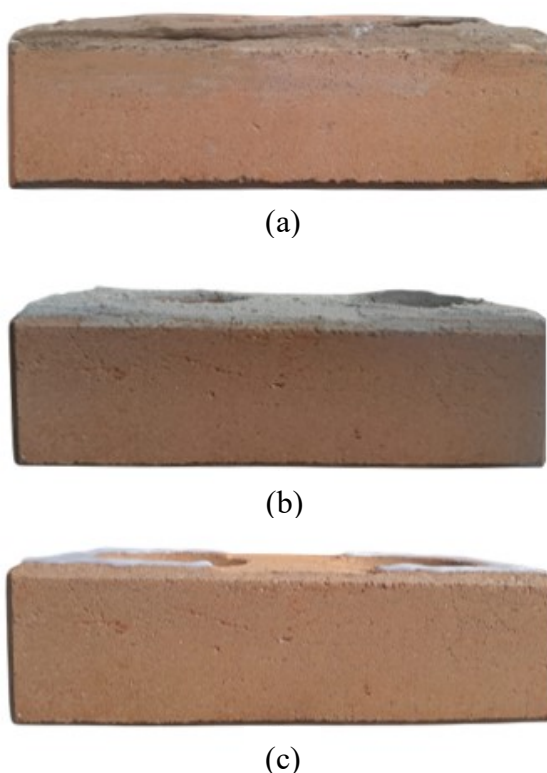
1600 = área da seção quadrada do dispositivo de carga ( $\text{mm}^2$ ).

Conforme estabelecido na NBR 16590-2 (ABNT, 2017) a argamassa polimérica foi submetida ao ensaio de espectroscopia por absorção no infravermelho, a fim de identificar seus grupos funcionais e estrutura química. O resultado da análise termogravimétrica foi obtido junto ao fabricante. Assim como a argamassa polimérica, a cola acrílica também foi submetida ao ensaio de espectroscopia por absorção no infravermelho. Demais informações sobre a composição e características específicas dos materiais foram disponibilizadas pelos fabricantes.

### 3.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Os ensaios de resistência ao cisalhamento foram realizados baseando-se nas diretrizes da norma europeia BS EN 1052-3 (BSI, 2002). Para cada tipo de material de assentamento foram confeccionados quinze prismas, compostos por três tijolos. A espessura média das juntas foi medida com auxílio de um paquímetro digital. As juntas compostas pelas argamassas colante e polimérica foi de  $2,50 \pm 0,01$  mm e a espessura das juntas compostas pela cola acrílica foi de  $1,04 \pm 0,01$  mm (Figura 3.3).

**Figura 3.3** – Aplicação dos materiais de assentamento em camadas finas: (a) argamassa colante; (b) argamassa polimérica; (c) cola acrílica.

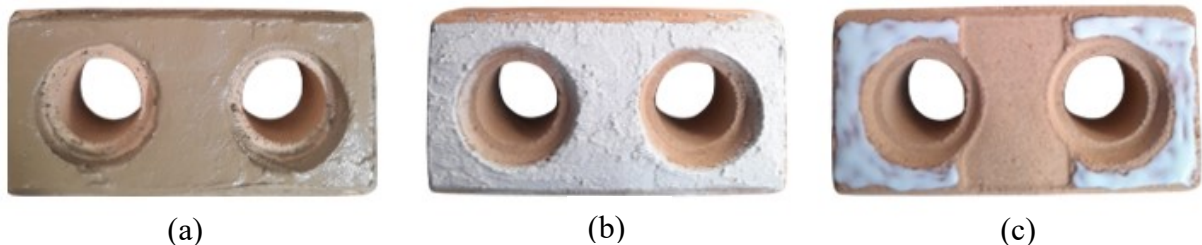


Conforme as orientações dos fabricantes, antes do assentamento dos prismas, a superfície dos tijolos foi limpa com auxílio de escova. As argamassas foram aplicadas sobre toda a superfície seca dos tijolos, com auxílio de espátula. Após a sobreposição dos tijolos, foi realizado o nivelamento e a verificação do prumo das amostras com auxílio de nível, esquadro e martelo de borracha. Em seguida foi feita a remoção do material excedente das laterais e da região interior dos prismas, a fim de evitar o preenchimento dos furos dos tijolos e a influência de um possível efeito de reforço.

A cola acrílica foi aplicada diretamente sobre as regiões laterais da superfície seca dos tijolos, evitando-se a região central que apresenta rebaixamento, o que poderia dificultar a secagem da cola (Figura 3.4). Embora os fabricantes da argamassa polimérica e da cola acrílica recomendem a aplicação em filetes para otimização construtiva, nos corpos de prova para o ensaio *triplet*, optou-se por aplicar esses materiais em uma área maior da face dos tijolos. Esta escolha metodológica teve como objetivo maximizar a área de aderência das juntas, garantindo que a resistência ao cisalhamento medida fosse representativa do potencial máximo da interface e não limitada pela geometria de aplicação em filetes. Assim, evitou-se que o modo de falha fosse dominado pela baixa área de contato, permitindo o isolamento e o estudo do comportamento mecânico real do material da junta sob carregamento.

Para garantir a uniformidade das superfícies das amostras, após sete dias de cura foi realizado o capeamento dos prismas com pasta de cimento, conforme diretrizes da NBR 5738 (ABNT, 2015). Para isso, as superfícies superior e inferior das amostras foram previamente umedecidas. Após remoção do excesso de água, as amostras foram posicionadas sobre a pasta de cimento, preparada sobre bancada nivelada e untada com óleo desmoldante.

**Figura 3.4** – Aplicação dos materiais de assentamento sobre a superfície dos tijolos de solo-cimento: (a) argamassa colante; (b) argamassa polimérica; (c) cola acrílica.



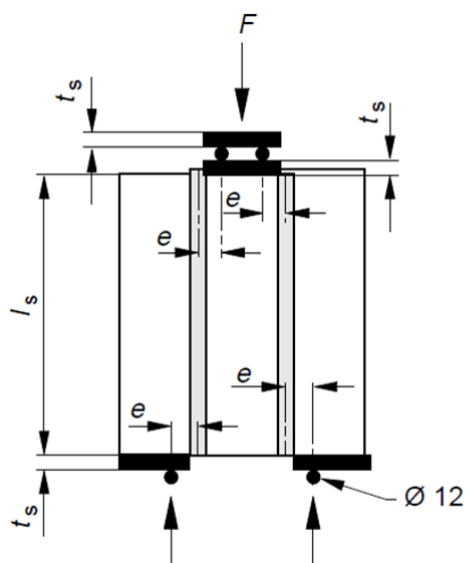
Baseando-se em estudos como de Dalalbashi *et al.* (2021), Li *et al.* (2023) e Quedou *et al.* (2021) segundo os quais a resistência mecânica de materiais cimentícios apresenta aumento com tempo prolongado de cura, optou-se por realizar os ensaios de resistência ao cisalhamento dos prismas após 120 dias. A cura das amostras (Figura 3.5) foi realizada em ambiente interno ao laboratório e sombreado. Em conformidade com a norma BS EN 1052-3 (BSI, 2002), para determinação da resistência ao cisalhamento dos prismas adotou-se o ensaio Tipo A, referente às amostras compostas por tijolos com altura menor ou igual a 200 mm.

**Figura 3.5** – Prisma de alvenaria para o ensaio de cisalhamento.



Para garantir a confiabilidade dos resultados, as seis amostras com os valores de resistência ao cisalhamento mais discrepantes em relação à resistência média foram descartadas. Tais amostras apresentaram separação entre as unidades anteriormente ao início do ensaio, devido a falhas no assentamento e/ou fissuras preexistentes. Portanto, nove prismas foram ensaiados para cada tipo de material de assentamento, dos quais três foram testados sob cada nível de tensão de pré-compressão (0,1 MPa, 0,3 MPa e 0,5 MPa). Segundo a norma, esses são os valores que devem ser adotados para amostras compostas por tijolos com resistência à compressão inferior à 10 MPa.

**Figura 3.6** – Esquema de carregamento dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento.



$F$ : força ou tensão aplicada ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$t_s$ : altura das placas de aço (mm)

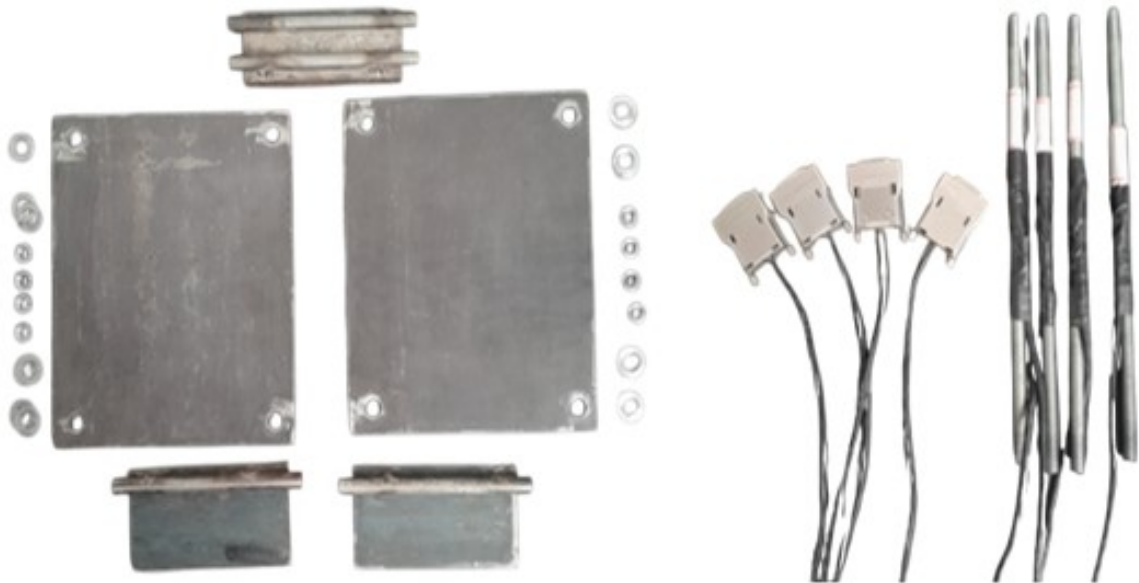
$l_s$ : comprimento das unidades (mm)

$e$ : distância entre os eixos das juntas e dos roletes (mm)

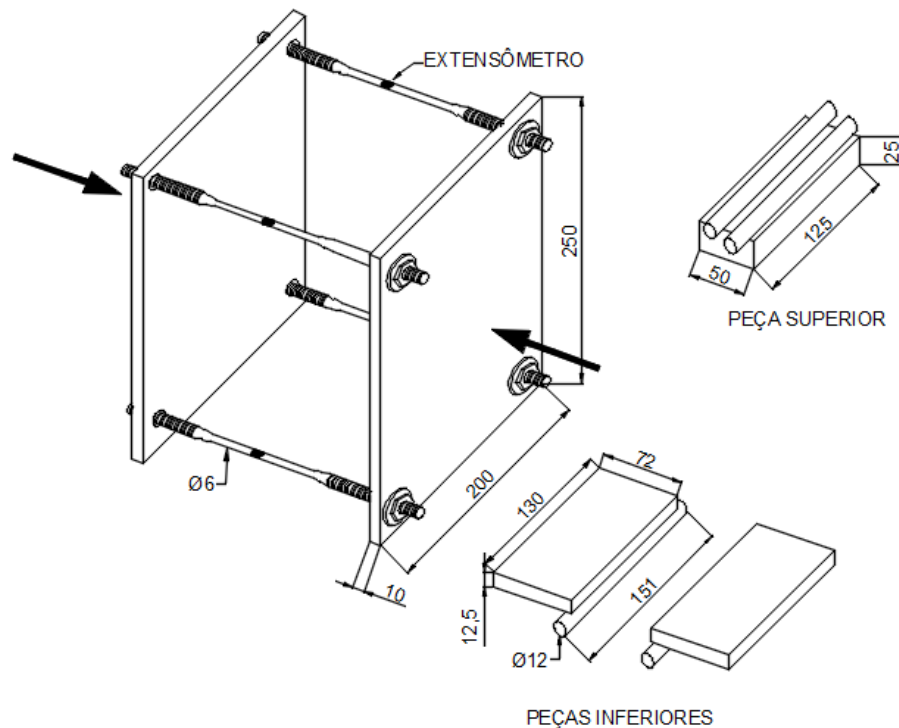
Fonte: adaptado de BS EN 1052-3 (BSI, 2002).

Baseando-se no esquema apresentado na norma (Figura 3.6), a tensão de pré-compressão foi aplicada por meio de um dispositivo composto por duas chapas de aço perfuradas nas quatro extremidades, transpassadas por quatro barras de aço, previamente instrumentadas com extensômetros (Figura 3.7).

**Figura 3.7** – Peças do dispositivo usado na realização dos ensaios de cisalhamento.



**Figura 3.8** – Esquema do dispositivo montado para a realização dos ensaios *triplet*.



Cada corpo de prova foi posicionado na prensa de ensaio, com as extremidades apoiadas em peças de aço. Uma vez posicionadas junto às faces capeadas do corpo de prova, as chapas foram comprimidas contra as laterais dos prismas, na direção perpendicular às juntas, por meio das barras de aço. A força de compressão foi aplicada manualmente, por meio do tensionamento de porcas e arruelas posicionadas nas extremidades das barras, conforme ilustra o esquema apresentado na Figura 3.8.

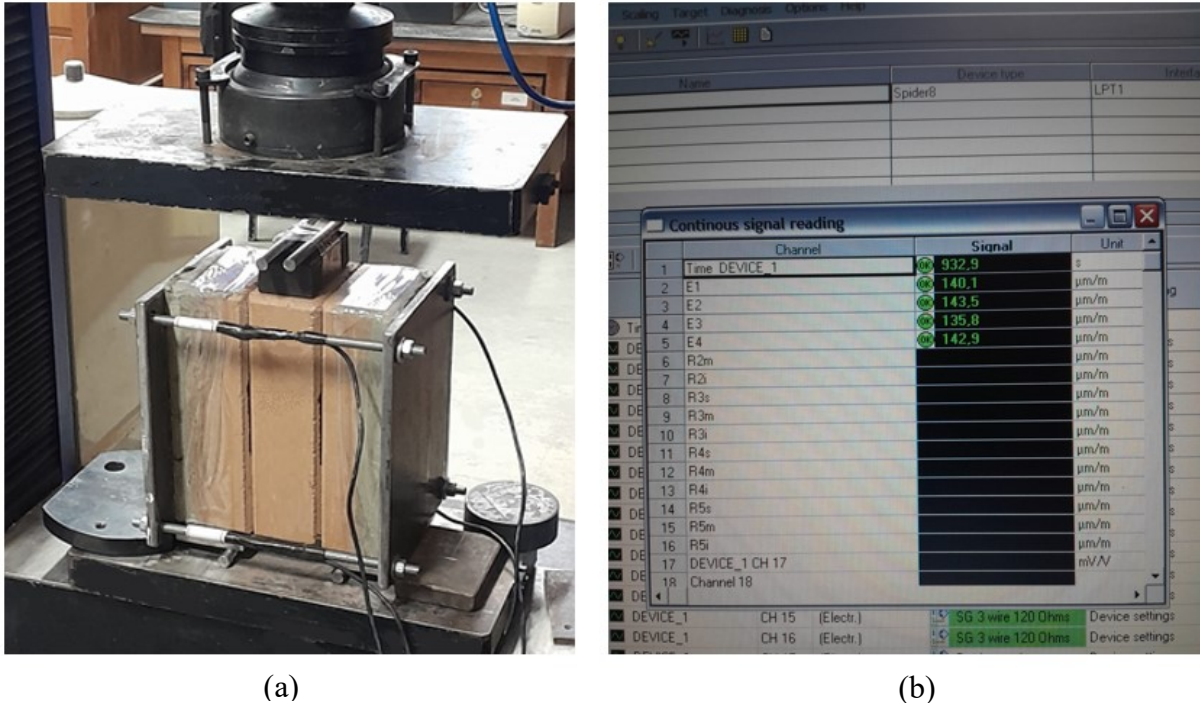
Conhecidas as dimensões das barras e das chapas, assim como o módulo de elasticidade do aço que as compõem, calculou-se os valores de deformação a serem aplicados às barras, correspondentes aos valores de pré-compressão que se determinou aplicar aos prismas (Tabela 3.1).

**Tabela 3.1** – Cálculo da deformação aplicada às barras de aço, conforme os níveis de pré-compressão.

<b>E aço (MPa)</b>	200.000		
<b>Área barra (mm<sup>2</sup>)</b>	28,27		
<b>Área prisma (mm<sup>2</sup>)</b>	31250		
	<b><math>\sigma_c</math> (MPa)</b>		
	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,5</b>
<b>F barra (N)</b>	781,25	2343,75	3906,25
<b><math>\sigma</math> barra (MPa)</b>	27,63	82,89	138,16
<b><math>\varepsilon</math> barra</b>	1,38E-04	4,14E-04	6,91E-04
<b><math>\varepsilon</math> barra (<math>\mu\text{m/m}</math>)</b>	138,16	414,47	690,78

O valor da tensão de compressão aplicado foi inferido indiretamente, por meio do monitoramento da deformação apresentada pelas barras de aço, cujos extensômetros foram conectados ao sistema de aquisição de dados HBM Spider 8 e processadas pelo *software* Catman (Figura 3.9).

**Figura 3.9** – Execução do ensaio de cisalhamento: (a) prisma posicionado na prensa; (b) monitoramento das deformações aplicadas.



Conforme especificado na norma, a força vertical foi aplicada a uma taxa de aumento da tensão de cisalhamento entre 0,1 MPa e 0,4 MPa, por meio da peça de aço central, contendo roletes posicionados em suas laterais. A resistência ao cisalhamento de cada amostra foi calculada conforme a Equação 3.5.

$$\tau = \frac{F_{i,máx}}{2 \times A_i} \quad (3.5)$$

Sendo:  $\tau$  = resistência individual do prisma ao cisalhamento (MPa);

$F_{i,máx}$  = força de cisalhamento máxima (N);

$A_i$  = área da seção paralela às juntas do prisma (mm<sup>2</sup>).

Devido à geometria perfurada dos tijolos de solo-cimento, a área de cisalhamento efetiva (área líquida) foi inferior à área bruta da face da unidade. Para garantir o rigor científico e a precisão dos parâmetros mecânicos reportados, todos os valores de tensão de ruptura ( $\tau_{rup}$ ) e módulo de cisalhamento ( $G$ ) foram calculados com base na área líquida de contato, conforme as diretrizes de medição da BS EN 772-16 (BSI, 2011) e os princípios de tensão efetiva da RILEM TC 127-MS (1996).

Embora normas de projeto estrutural priorizem a área bruta por conservadorismo e praticidade no dimensionamento de alvenarias, a consideração da área líquida para as análises foi essencial para isolar a eficiência química intrínseca dos materiais — notadamente da cola acrílica — da geometria do componente. O uso da área bruta em unidades com vazios violaria o princípio físico da tensão real ( $\tau = F/A$ ), distribuindo a carga sobre regiões onde não houve transferência de esforços. Além disso, essa metodologia permitiu uma estimativa mais precisa dos erros padrão (Tabela 4.13) e uma discussão fundamentada sobre a transferência de danos para as unidades, garantindo que o desempenho dos materiais poliméricos fosse avaliado por sua capacidade de aderência real e não diluído por fatores geométricos externos.

Embora a norma BS EN 1052-3 (BSI, 2002) não utilize explicitamente o termo “área líquida” em seu texto principal, sua aplicação remete ao conceito de área de contato efetiva ( $A_i$ ). No caso desta pesquisa, como não houve o preenchimento dos furos pelos materiais de assentamento, a área resistente consistiu estritamente da superfície de interface.

Assim, os diferentes modos de aplicação dos materiais exigiram fatores de correção específicos, calculados conforme as Equações 3.6 e 3.7 e detalhados na Tabela 3.2. As argamassas colante e polimérica preencheram toda a área líquida disponível, resultando em um fator de correção de 1,18. Já a cola acrílica, por ter sido aplicada de forma a evitar a região central rebaixada dos tijolos, que dificultaria a secagem do material, apresentou uma área de contato ainda mais reduzida, exigindo um fator de 2,23.

- Cálculo do fator de correção para as juntas de argamassa colante e polimérica:

$$A_b = l \times w = 250 \times 125 = 31250 \text{ mm}^2$$

$$A_f = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 55^2}{4} = 2376 \text{ mm}^2$$

$$A_l = A_b - 2 \times A_f = 31250 - 2 \times 2376 = 26498 \text{ mm}^2$$

$$FC = \frac{A_b}{A_l} = \frac{31250}{26498} = 1,18 \quad (3.6)$$

- Cálculo do fator de correção para as juntas de cola acrílica:

$$A_b = l \times w = 250 \times 125 = 31250 \text{ mm}^2$$

$$A_f = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 55^2}{4} = 2376 \text{ mm}^2$$

$$A_r = l \times w = 100 \times 125 = 12500 \text{ mm}^2$$

$$A_l = A_b - 2 \times A_f - A_r = 31250 - 2 \times 2376 - 12500 = 13998 \text{ mm}^2$$

$$FC = \frac{A_b}{A_l} = \frac{31250}{13998} = 2,23 \quad (3.7)$$

Em que:  $A_b$  = área bruta ( $\text{mm}^2$ );

$A_f$  = área do furo ( $\text{mm}^2$ );

$A_l$  = área líquida ( $\text{mm}^2$ );

$A_r$  = área rebaixada ( $\text{mm}^2$ );

$l$  = comprimento (mm);

$w$  = largura (mm);

$d$  = diâmetro do furo (mm);

$FC$  = fator de correção.

**Tabela 3.2** – Área efetiva (área líquida) de cisalhamento conforme material de assentamento.

Tipo de junta	Área bruta de cisalhamento ( $\text{mm}^2$ )	Área líquida de cisalhamento ( $\text{mm}^2$ )	Fator de correção
AC	31250	26498	1,18
AP	31250	26498	1,18
CA	31250	13998	2,23

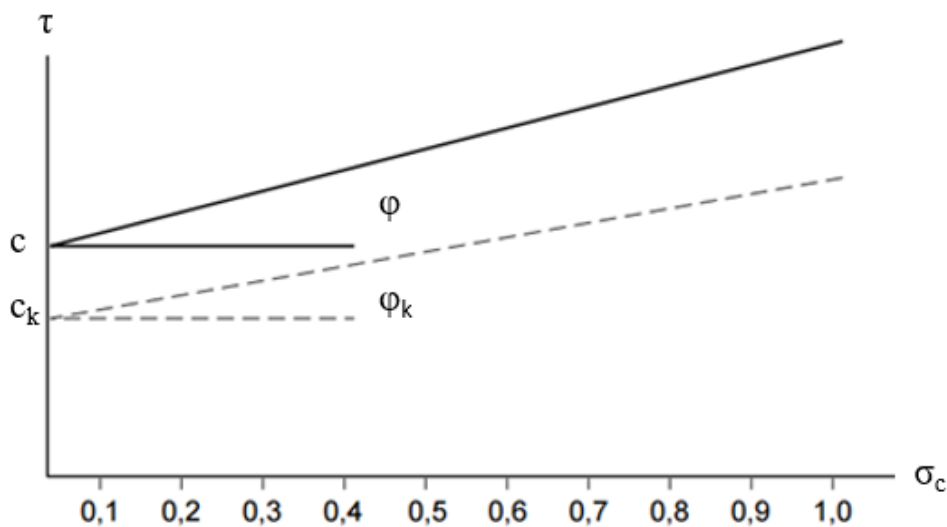
Uma vez que o ensaio *triplet* foi executado com o objetivo de determinar a resistência dos prismas de alvenaria ao cisalhamento puro, para minimizar a excentricidade da força vertical aplicada e evitar a introdução de momentos fletores, foram adotadas medidas de controle em duas etapas:

- Centralização inicial: o corpo de prova foi posicionado com precisão na base da máquina universal, utilizando-se uma régua e marcação para alinhar o centro do prisma com o centro da base da prensa. Essa etapa garantiu que a carga fosse aplicada na vertical, passando o mais próximo possível do eixo central do corpo de prova.

- Neutralização de momento residual: para acomodar quaisquer desalinhamentos residuais ou irregularidades dimensionais no sistema, o dispositivo de ensaio utilizou apoios articulados (roletes). Ao permitir o giro livre das placas de apoio, os roletes neutralizaram qualquer momento fletor residual, assegurando que as tensões transmitidas às juntas fossem predominantemente de cisalhamento. Desta forma, o alinhamento geométrico somado ao controle passivo de momento fornecido pelos apoios articulados, permitiu que a excentricidade de aplicação da carga fosse considerada desprezível para os fins da pesquisa.

Com os resultados obtidos, foi plotado o gráfico de resistência ao cisalhamento (Figura 3.10), para os três grupos de prismas, conforme o material de assentamento usado e em função das tensões de pré-compressão. Por meio de regressão linear, determinou-se a resistência inicial ao cisalhamento ou coesão ( $c$ ); a resistência inicial ao cisalhamento característica ( $c_k = 0,8c$ ), o coeficiente de atrito ( $\text{tg}(\varphi)$ ) e o coeficiente de atrito característico ( $\varphi_k = 0,8\text{tg}(\varphi)$ ), de acordo com as diretrizes da norma BS EN 1052-3 (BSI, 2002).

**Figura 3.10** – Gráfico da resistência ao cisalhamento ( $\tau$ ) vs. tensão de pré-compressão ( $\sigma_c$ ).



Fonte: adaptado de BS EN 1052-3 (BSI, 2002).

Em que:  $\tau$  = resistência ao cisalhamento do prisma (MPa);

$c$  = resistência inicial ao cisalhamento ou coesão (MPa);

$c_k$  = resistência inicial ao cisalhamento ou coesão característica (MPa);

$\sigma_c$  = tensão de pré-compressão (MPa);

$\varphi$  = ângulo de atrito (graus ou radianos);

$\varphi_k$  = ângulo de atrito característico (graus ou radianos).

Segundo a norma, deverão ser descartadas as amostras que apresentarem falha por cisalhamento na unidade paralela à junta, por esmagamento ou por fissuração das unidades. Por outro lado, deverão ser considerados válidos os resultados em que a ruptura ocorrer por cisalhamento na interface unidade-argamassa ou apenas na argamassa. Se a falha não se enquadrar nesses critérios, os resultados obtidos poderão ser utilizados como um limite inferior para a resistência ao cisalhamento das amostras sob cada nível de pré-compressão (BSI, 2002).

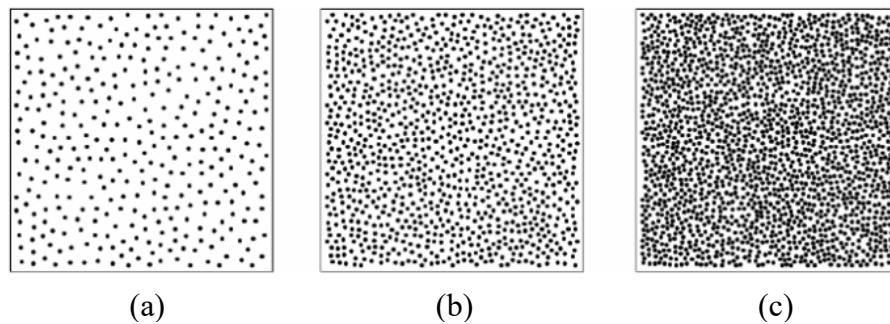
Na presente pesquisa, optou-se por essa última abordagem devido à geometria dos tijolos, cujas saliências e rebaixos, provoca concentração de tensões nas áreas de encaixe. Conseqüentemente, a resposta ao cisalhamento torna-se mais complexa, assim como o controle sobre o modo de falha das amostras.

### 3.3 ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES

A análise das deformações por cisalhamento das juntas dos prismas foi realizada por meio da técnica de Correlação de Imagens Digitais ou *Digital Image Correlation* (DIC). A Correlação de Imagens Digitais (DIC) é um método óptico, sem contato, usado para medir os deslocamentos e as deformações de espécimes submetidos a cargas externas (Ahmed *et al.*, 2021). É um método que se destaca na investigação do comportamento de estruturas de alvenaria sob carregamento lateral. Sua capacidade de fornecer informações detalhadas sobre deformação, microfissuração, propagação de fissuras e regiões de concentração de tensões a torna particularmente adequada para essa aplicação (Basha *et al.*, 2022).

O DIC opera a partir do mapeamento de subconjuntos de pixels, entre uma imagem de referência (estado não deformado) e imagens subsequentes (estados deformados) (Basha *et al.*, 2022; Howlader *et al.*, 2021). O método divide a imagem inicial em pequenas seções, chamadas *subsets*, blocos ou facetas. Para cada faceta, um algoritmo busca sua nova posição na imagem deformada, rastreando a intensidade de cor dos pixels. Com isso, o algoritmo calcula o deslocamento de cada faceta e, a partir desses deslocamentos, determina as deformações sofridas pelo objeto. Para garantir que cada faceta tenha uma correspondência única, aplica-se um padrão aleatório de alto contraste, conhecido como *speckle*, na superfície do objeto (Figura 3.11). Geralmente feito com tinta, esse padrão torna simples a preparação experimental (Beleza, 2017).

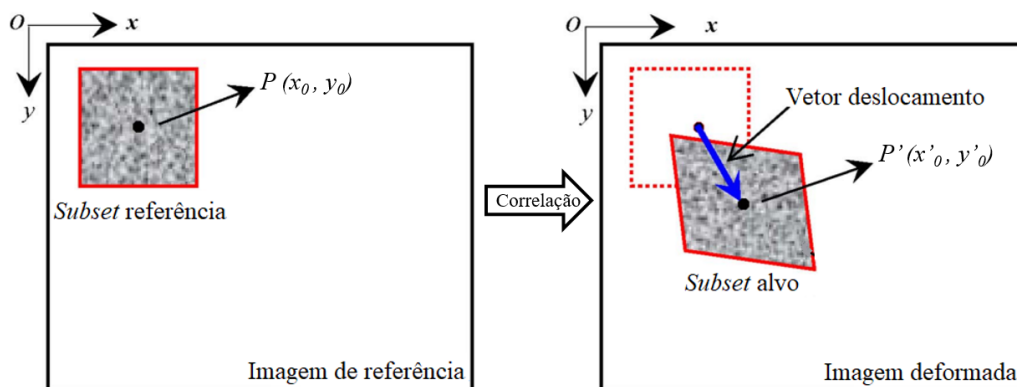
**Figura 3.11** – Três padrões *speckle* com diâmetro de 5 pixels e uma cobertura de (a) 10%, (b) 30% e (c) 50%.



**Fonte:** Lecompte *et al.* (2015).

Na Figura 3.12, o quadrado vermelho é a faceta (um conjunto de pixels). A correlação consiste em rastrear o movimento do ponto central  $P(x_0, y_0)$  da imagem de referência (antes da deformação) para imagens deformadas  $P'(x'_0, y'_0)$ . O rastreamento da faceta é realizado usando funções de correlação, sendo a Correlação Cruzada Normalizada, a Soma das Diferenças Quadradas e a Soma das Diferenças Quadradas Normalizada as mais utilizadas. Posteriormente, os campos de deformação são obtidos diferenciando-se os campos de deslocamento (Beleza, 2017; Pan, 2009).

**Figura 3.12** – Rastreamento do deslocamento de uma faceta ou *subset*.



**Fonte:** adaptado de Pan (2009).

Nesta pesquisa, anteriormente à realização dos ensaios de cisalhamento, a superfície frontal dos prismas foi pintada na cor branca e posteriormente tinta preta foi aspergida com auxílio de escova, a fim de assegurar a precisão da identificação e do rastreamento das imagens deformadas e não deformadas pelo algoritmo de correlação (Figura 3.13).

**Figura 3.13** – Prisma após aplicação do padrão *speckle*.

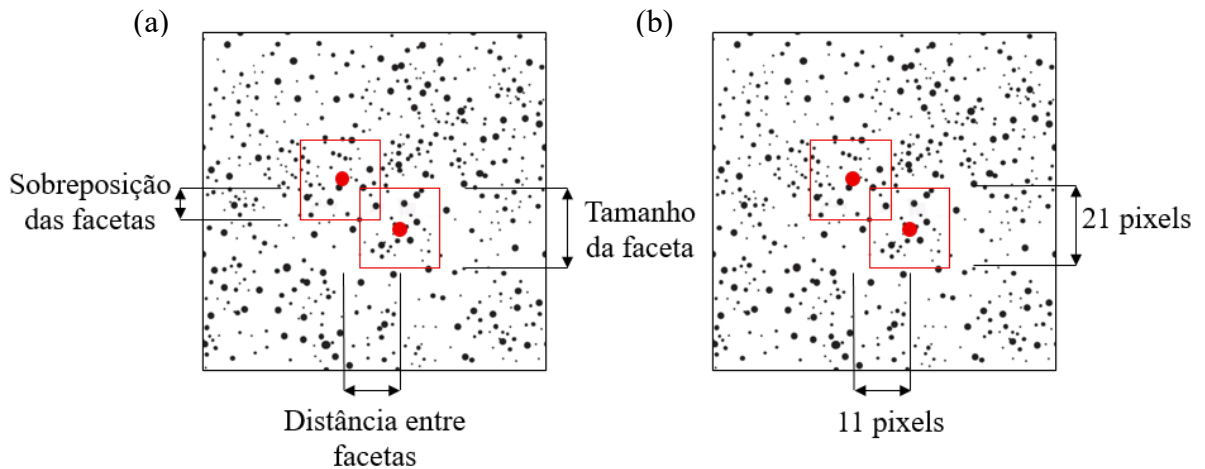


As imagens dos ensaios foram obtidas de forma contínua por meio de aparelho celular, em resolução Full HD ( $1920 \times 1080$  pixels), a uma taxa de 30 quadros por segundo. O procedimento foi realizado sob iluminação natural, com o aparelho posicionado em um tripé, a aproximadamente 50 cm de distância do corpo de prova. A análise das imagens e a consequente determinação das deformações foram realizadas por meio da versão gratuita do *software* gratuito GOM *Correlate*, do grupo ZEISS *Industrial Quality Solutions*. Assim como a maioria dos *softwares* DIC, o GOM *Correlate* utiliza a Correlação Cruzada Normalizada como sua principal função de correlação.

Uma característica exclusiva desse *software* é a inclusão de uma ferramenta que permite verificar a qualidade do padrão aleatório de manchas aplicado à amostra. Essa funcionalidade permite identificar e mitigar potenciais erros relacionados à preparação da amostra, contribuindo para a precisão e confiabilidade dos resultados da análise (Jorge *et al.*, 2022). Para que haja melhor correlação entre os deslocamentos, é fundamental que as facetas de pixels se sobreponham (Figura 3.14 (a)). A sobreposição produz redundância nas correlações locais das facetas vizinhas, ajudando na rejeição de valores discrepantes (*outliers*) (Yazzie *et al.*, 2010).

Conforme a Figura 3.14 (b), para garantir uma sobreposição adequada entre as facetas, a continuidade dos dados e a precisão dos cálculos de deformação, o tamanho e a distância das facetas foram iguais a 21 pixels e 11 pixels, respectivamente (valores pré-definidos pelo *software*).

**Figura 3.14** – Parâmetros para a análise DIC: (a) principais propriedades das facetas; (b) tamanho e sobreposição das facetas empregadas no presente estudo.



A técnica de Correlação de Imagens Digitais gera um vasto campo de deformações e deslocamentos para cada corpo de prova, fornecendo uma descrição detalhada da evolução da fissuração e da concentração de tensões. Reconhecendo a impossibilidade de apresentar quantitativamente todos os campos de deformação gerados e a necessidade de converter a informação visual em um indicador numérico comparável, optou-se por utilizar o método de deformação média (*Average Strain*) disponível no *software* GOM Correlate.

O indicador quantitativo utilizado foi a deformação média ( $\bar{\epsilon}$ ) calculada em uma área de interesse (AOI) predefinida. Essa AOI foi delimitada para incluir especificamente a junta de argamassa e as regiões imediatamente adjacentes aos tijolos, onde a localização da deformação é máxima. O valor de deformação média representa a deformação suportada pela interface sob a tensão de cisalhamento aplicada.

Essa deformação, após conversão para o valor de deformação de engenharia por cisalhamento ( $\gamma$ ), constituiu o indicador quantitativo primário. Com este indicador, foi possível plotar as curvas de  $\tau$  (tensão de cisalhamento) versus  $\gamma$  (deformação por cisalhamento). A partir da análise destas curvas, foram derivados os seguintes parâmetros estruturais essenciais:

- Módulo de cisalhamento ( $G$ ): determinado quantitativamente a partir da inclinação da porção elástica (linear) inicial da curva  $\tau$  vs.  $\gamma$ .
- Capacidade de deformação ( $\gamma_{rup}$ ): quantificada pelo valor de deformação máxima atingido pela junta no pico de tensão, no instante da ruptura.

Dessa forma, o indicador  $\gamma$  derivado da análise *Average Strain* da DIC atende aos objetivos específicos da pesquisa, permitindo a análise quantitativa da relação tensão–deformação e a avaliação da influência da aderência e da pré-compressão no comportamento da junta ao cisalhamento.

### 3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Dada a natureza da pesquisa, que investigou a influência de dois fatores categóricos (material de assentamento e nível de pré-compressão) sobre variáveis quantitativas (módulo de cisalhamento, tensão de ruptura e deformação de ruptura), foi realizada uma análise estatística dos resultados utilizando-se o *software* JASP (*Joint Statistical Power*). O método principal de inferência foi a Análise de Variância ou *Analysis of Variance* (ANOVA).

A ANOVA Fatorial foi aplicada a fim de determinar se os fatores em estudo — *material* (3 níveis: AC, AP, CA) e *pré-compressão* (3 níveis: 0,1 MPa, 0,3 MPa, 0,5 MPa) — exerceram um efeito estatisticamente significativo sobre as variáveis dependentes (Tabela 3.3).

**Tabela 3.3** – Variáveis da Análise de Variância (ANOVA).

Variáveis independentes (Fatores)	Variáveis dependentes
<i>Material</i> (AC, AP, CA)	Módulo de cisalhamento ( $G$ )
<i>Pré-compressão</i> (0,1 MPa, 0,3 MPa, 0,5 MPa)	Deformação de ruptura por cisalhamento ( $\gamma_{rup}$ )
<i>Interação</i> ( <i>material vs. pré-compressão</i> )	Tensão de ruptura por cisalhamento ( $\tau_{rup}$ )

O teste ANOVA decompõe a variância total observada nos dados, separando a variância atribuível aos fatores (efeitos principais) da variância residual (erro). O resultado final do teste é expresso pelo *p-valor*, calculado a partir da estatística  $F$ , que é a razão entre a variância entre os grupos e a variância dentro dos grupos ou erro (Sawyer, 2017). Adotou-se o nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ), de forma que:

- Se  $p < 0,05$ , o fator (ou a interação entre os fatores) teve um efeito significativo sobre a variável dependente.
- Se  $p > 0,05$ , o fator foi considerado estatisticamente não significativo.

A análise incluiu o efeito de interação entre *material* e *pré-compressão* (*material* vs.  $\sigma_c$ ). Uma interação significativa indica que o efeito da pré-compressão varia dependendo do material, ou vice-versa, sendo fundamental para compreender o comportamento de cada tipo de junta. Ao ser indicado pelo teste ANOVA que um fator principal ou um termo de interação foi estatisticamente significativo ( $p < 0,05$ ), um teste *post hoc* de Diferença Mínima Significativa de Tukey (*Honest Significant Difference* – HSD) foi realizado.

O teste *post hoc* de Tukey é um procedimento de comparação múltipla projetado para identificar quais pares de grupos são significativamente diferentes entre si. Este teste realiza todas as comparações possíveis e fornece um *p-valor* ajustado para cada par. Assim como na ANOVA, o *p-valor* é então comparado ao nível de significância pré-estabelecido ( $\alpha = 0,05$ ). Se  $p < 0,05$ , a diferença entre os grupos foi considerada estatisticamente significativa.

Por outro lado, se  $p > 0,05$ , a diferença observada foi atribuída ao acaso e os grupos foram considerados estatisticamente equivalentes (Abdi; Williams, 2010; Nanda *et al.*, 2021). A aplicação deste critério permitiu agrupar os materiais (ou as condições de ensaio, no caso da interação) em classes de desempenho estatisticamente equivalentes.

Devido à natureza dos materiais à base de solo-cimento, que inerentemente apresentam variabilidade, foram adotadas estratégias de controle de qualidade e gestão dos dados para garantir a validade estatística dos resultados. O planejamento experimental inicial previu o ensaio de cinco prismas ( $n = 5$ ) para cada combinação de fatores, um número alinhado com as práticas recomendadas em normas e recomendações técnicas para ensaios de alvenaria, como a BS EN 1052-3 (BSI, 2002) e a RILEM TC 127-MS (1996).

Essa margem de segurança foi fundamental para o controle de qualidade dos dados. Para as análises estatísticas finais, apenas três prismas com o comportamento mais consistente e representativo foram selecionados, descartando-se os dois que apresentaram falhas e/ou fissuras prévias. Essa seleção visou mitigar o impacto de variâncias excessivas, aprimorando a homogeneidade do conjunto de dados utilizado para a ANOVA.

Para evitar o risco de pseudorrepetição, o processo de produção dos prismas seguiu um protocolo de controle de qualidade. Embora os materiais usados fossem de lotes únicos, garantiu-se a uniformidade da aplicação de diferentes formas: para a argamassa colante, foi realizado o processo de homogeneização mecânica com água imediatamente antes da produção

de cada prisma; já para a argamassa polimérica e a cola acrílica, que foram fornecidas prontas para uso, as embalagens foram agitadas manualmente antes da aplicação, para assegurar a constância das propriedades dos materiais em todos os corpos de prova. Adicionalmente, o sequenciamento dos ensaios na prensa foi aleatório, garantindo a independência estatística das observações.

A análise da influência conjunta dos fatores (tipo de material de assentamento e tensão de pré-compressão) foi o foco principal da ANOVA Fatorial. O termo de interação na ANOVA foi examinado para verificar se o efeito do material foi dependente do nível de compressão. Embora não tenham sido realizados testes formais prévios de verificação de pressupostos estatísticos (como os testes de Shapiro-Wilk para normalidade ou de Levene para homocedasticidade), a metodologia adotada foi definida para minimizar o impacto de eventuais violações:

- A remoção das amostras não-conformes garantiu a minimização da variância excessiva (promovendo a homogeneidade).
- A ANOVA Fatorial é reconhecida por ser um teste relativamente robusto contra pequenas violações dos pressupostos de normalidade, especialmente quando o número de repetições é equilibrado (Schmider *et al.*, 2010).

A análise estatística foi complementada pela visualização gráfica dos resultados (gráficos de interação), que permitiu interpretar como a combinação dos fatores afetou o desempenho das amostras de alvenaria.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são discutidos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais e de resistência ao cisalhamento, assim como os resultados da análise de deformações realizada por meio de Correlação de Imagens Digitais (DIC).

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seguir apresenta-se o resumo dos principais resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais. Os resultados completos das análises podem ser consultados no Apêndice A.

#### 4.1.1 Tijolos de solo-cimento

A Tabela 4.1 resume os principais resultados da análise FRX (fluorescência de raios X) dos tijolos de solo-cimento. A análise FRX é utilizada para determinar a composição química elementar, ou seja, os elementos e óxidos presentes no material e suas proporções.

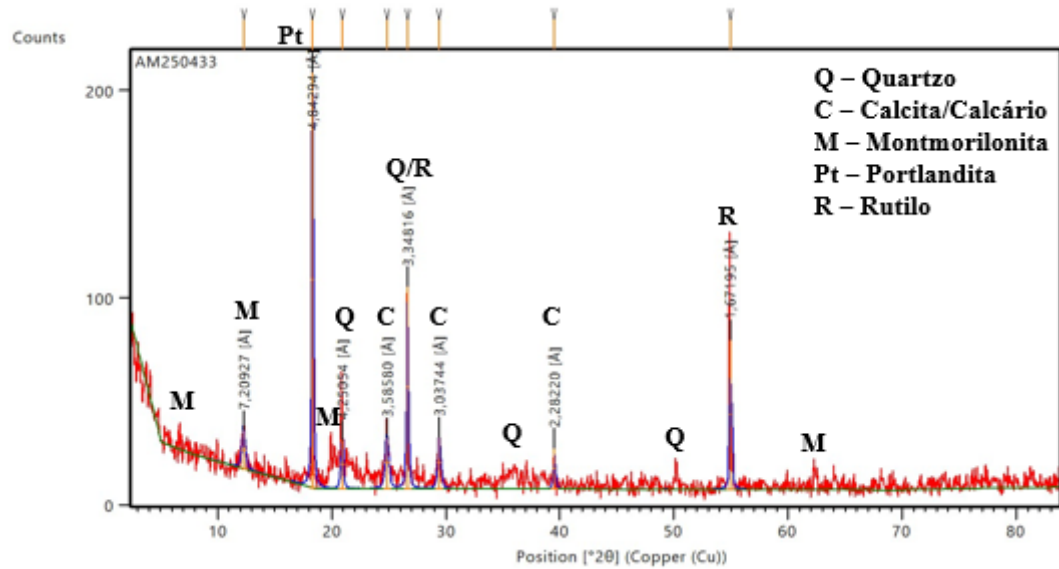
**Tabela 4.1** – Tijolos de solo-cimento: principais resultados da análise FRX (%).

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>LOI</b>
Sílica	Alumina	Óxido de cálcio	Óxido férrico	Perda ao fogo
40,00	24,30	10,10	8,20	15,20

Os resultados são consistentes com a composição de um tijolo de solo-cimento. A presença de altos teores de sílica (40,00%) e alumina (24,30%) é uma característica do solo, principal componente dos tijolos. A quantidade de óxido de cálcio (10,10%) é um indicador da porcentagem de cimento na mistura. A alta porcentagem de LOI (15,20%), indica alto teor de argilominerais no solo.

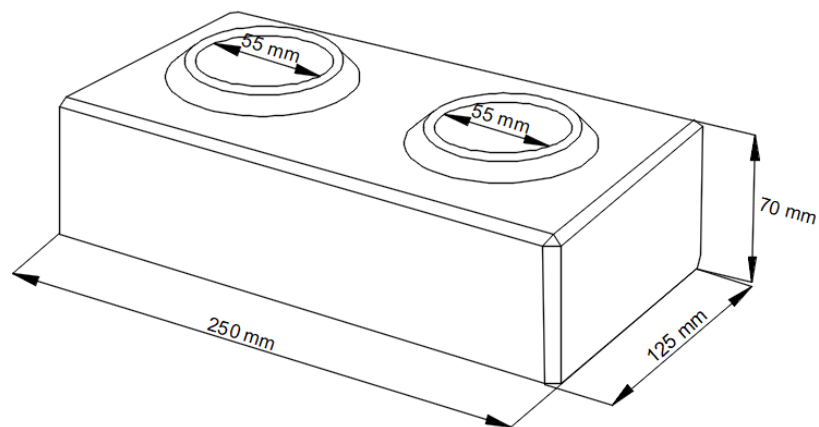
O ensaio de difração de raios X (DRX) é usado para identificar as fases cristalinas presentes em um material, ou seja, a estrutura atômica dos compostos. A Figura 4.1 apresenta os picos de difração do tijolo de solo-cimento.

**Figura 4.1** – Tijolos de solo-cimento: perfil cristalográfico.



O espectro de DRX do tijolo de solo-cimento revela uma composição rica em minerais característicos de um solo natural (principalmente quartzo) e em produtos de hidratação do cimento (como a calcita). Assim, a análise confirma que o material é uma mistura de minerais do solo original com compostos inorgânicos do cimento. A Figura 4.2 apresenta os resultados da análise dimensional dos tijolos, executada conforme a NBR 8492 (ABNT, 2012).

**Figura 4.2** – Dimensões dos tijolos de solo-cimento.



O lote de tijolos de solo-cimento apresentou dimensões uniformes. Os valores de desvio-padrão ficaram abaixo da tolerância ( $\pm 1,00$  mm) para este tipo de material, segundo diretrizes da NBR 8491 (ABNT, 2012). Essa alta consistência foi confirmada pelo coeficiente de variação, cujos valores foram inferiores a 0,5% em todas as dimensões medidas. A taxa de absorção de água

(18,90%) também ficou abaixo do limite de 20% permitido pela norma (ABNT, 2012). A Tabela 4.2 resume os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão dos tijolos.

**Tabela 4.2** – Tijolos de solo-cimento: resistência à compressão.

	<b>Grupo A</b>	<b>Grupo B</b>
	Cimento CPIII; 28 dias	Cimento CPV-ARI; 120 dias
<b>f<sub>t</sub> (MPa)</b>	4,79	6,10
<b>dp (MPa)</b>	0,66	0,49
<b>CV (%)</b>	13,82	8,06

Observa-se que a cura prolongada por 120 dias aumentou a resistência média à compressão dos tijolos. A resistência média do Grupo B (6,10 MPa) foi 27,3% maior do que a do Grupo A (4,79 MPa). Esse aumento foi esperado, pois o processo de hidratação do cimento, responsável pela resistência do material, continua a ocorrer ao longo do tempo, solidificando a microestrutura e aumentando sua capacidade de suportar cargas (Caronge *et al.*, 2017). A maior resistência das amostras do Grupo B também resultou, possivelmente, do uso de cimento de maior resistência inicial.

A cura mais longa também levou a uma maior consistência nos resultados dos testes. O coeficiente de variação do Grupo B (8,06%) foi menor do que o CV do Grupo A (13,82%). Isso sugere que a cura prolongada não apenas aumentou a resistência, mas também reduziu a variabilidade entre as amostras, resultando em um produto mais homogêneo e previsível.

#### 4.1.2 Argamassa colante

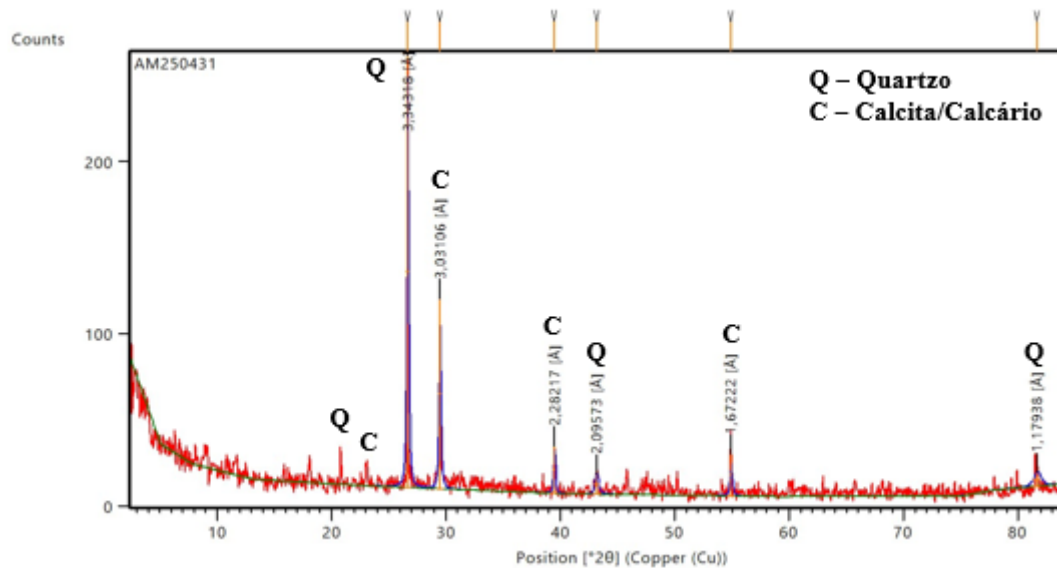
A Tabela 4.3 apresenta os principais elementos componentes da argamassa colante.

**Tabela 4.3** – Argamassa colante: análise FRX (%).

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>LOI</b>
Sílica	Óxido férrico	Alumina	Óxido de cálcio	Perda ao fogo
34,70	4,50	3,90	34,00	19,30

A alta porcentagem de óxido de cálcio (34,00%) presente no material confirma a base cimentícia do produto. Os valores de sílica (34,70%) e alumina (3,90%) indicam a presença de areia como agregado, essencial para o desempenho da argamassa. O valor elevado da LOI (19,30%) pode sugerir que a presença de aditivos na composição, como polímeros característicos desse tipo de argamassa. A Figura 4.3 apresenta os picos de difração da argamassa colante, obtidos por meio do ensaio de DRX.

**Figura 4.3** – Argamassa colante: perfil cristalográfico (DRX).

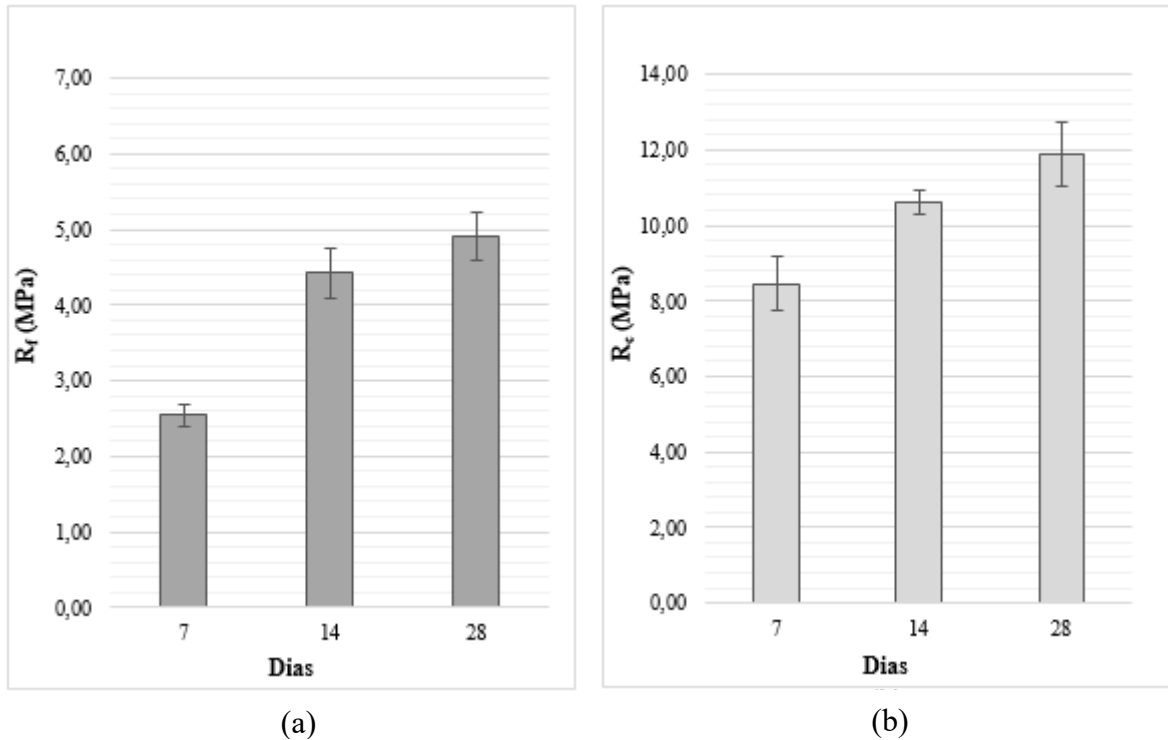


Com base nos picos identificados, os principais componentes cristalinos presentes na amostra são o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), componente principal do agregado (areia) e a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), componente comum do cimento Portland. Assim, a análise de DRX confirma que a argamassa colante é um material predominantemente inorgânico e cristalino, com quartzo e calcita como as fases minerais mais abundantes.

A Figura 4.4 (a) mostra a resistência média à tração na flexão ( $R_f$ ) da argamassa colante, para três períodos de cura: 7, 14 e 28 dias. A argamassa colante demonstrou um aumento progressivo e significativo na resistência à tração na flexão com o tempo de cura. O maior ganho de resistência ocorreu entre 7 e 14 dias (74%), indicando que esta é uma fase crucial para a solidificação do material. As amostras de argamassa curadas por 28 dias apresentaram resistência à tração flexão 11% maior do que aquelas curadas por 14 dias. Os coeficientes de variação (abaixo de 8%) apontam para uma consistência nos resultados de resistência à tração

na flexão em todas as idades de cura. Isso sugere um produto de alta qualidade e com desempenho previsível.

**Figura 4.4** – Argamassa colante ACIII: (a) resistência à tração na flexão; (b) resistência à compressão.



Conforme mostra a Figura 4.4 (b), a argamassa colante apresentou resistência à compressão ( $R_c$ ) considerável após uma semana de cura. Aos 14 dias houve um aumento significativo na resistência à compressão, com um ganho de cerca de 25% em relação aos 7 dias. O CV de 2,84% é baixo, o que demonstra uma alta uniformidade e repetibilidade nos resultados. Isso sugere que o processo de hidratação e ganho de resistência da argamassa foi muito consistente neste período.

Aos 28 dias, a resistência à compressão continuou a aumentar, embora o ganho tenha sido menor do que o observado entre 7 e 14 dias (12%). O CV de 7,04% retornou a um valor mais próximo do observado aos 7 dias, mas ainda pode ser considerado bom, indicando que a consistência geral dos resultados foi mantida. A variação do tempo de cura de 7 a 28 dias resultou em um aumento de 40% na resistência à compressão das amostras.

Segundo Chen e Wu (2013), a argamassa ganha resistência com o tempo, devido as contínuas reações de hidratação do cimento e formação de gel C-S-H (silicato de cálcio hidratado), que

preenche os poros e densifica a estrutura interna do material. Assim, usualmente um maior tempo de cura resulta em argamassas mais resistentes.

### 4.1.3 Argamassa polimérica

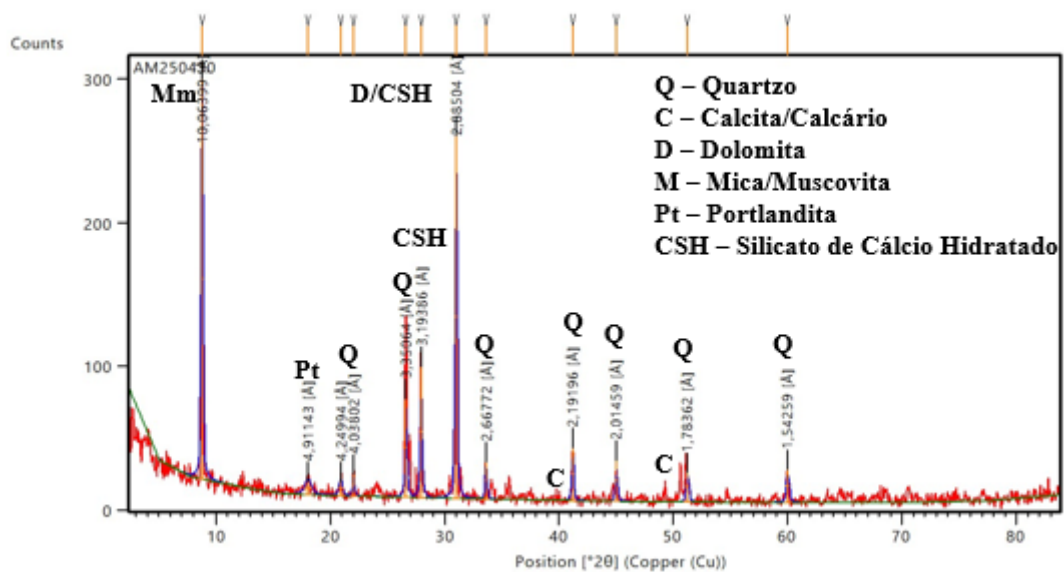
Conforme a Tabela 4.4, a argamassa polimérica apresenta uma formulação diferente das argamassas tradicionais, que têm a sílica como componente principal.

**Tabela 4.4** – Argamassa polimérica: análise FRX (%).

<b>C</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>LOI</b>
Carbono	Sílica	Óxido de cálcio	Óxido de magnésio	Perda ao fogo
15,10	11,30	25,50	17,00	41,81

A argamassa polimérica contém altos teores de óxidos de cálcio (25,50%) e magnésio (17,00%), o que pode indicar uma base principal formada por carbonato de cálcio e dolomita, frequentemente usada como carga mineral ou agregado em argamassas. A alta perda de massa (41,81%) pode ser devida a presença de polímeros ou de outros componentes voláteis no material. A Figura 4.5 mostra o perfil cristalográfico da argamassa polimérica, resultante da análise por DRX.

**Figura 4.5** – Argamassa polimérica: perfil cristalográfico (DRX).

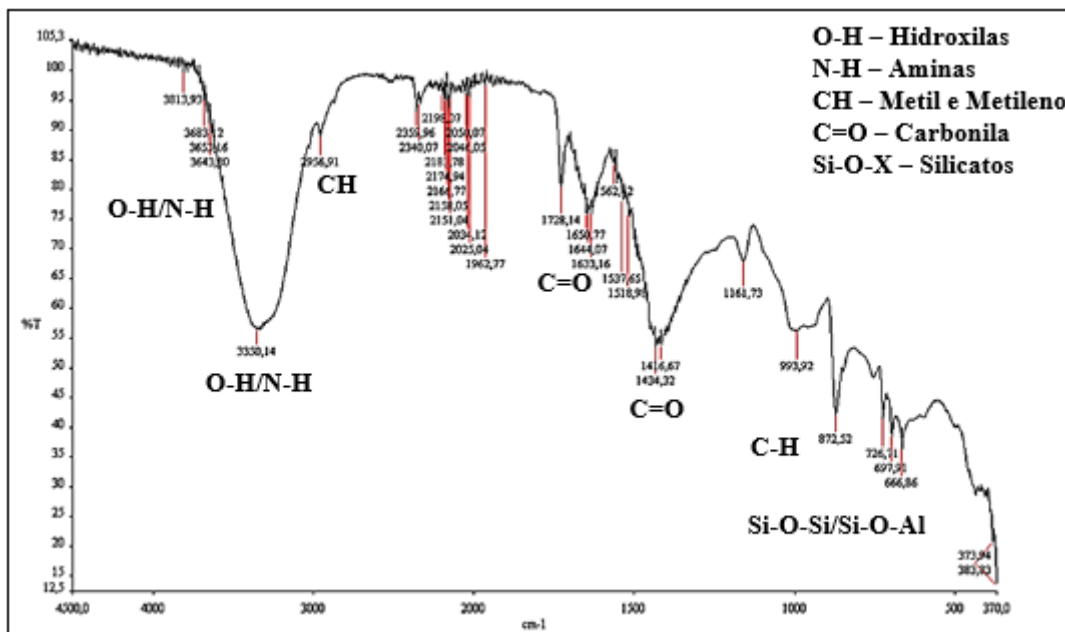


A argamassa apresenta uma composição híbrida, característica de materiais compósitos que utilizam cargas minerais em uma matriz orgânica. Os picos de maior intensidade identificados correspondem ao quartzo e à mica/muscovita, indicando que a fração inorgânica é composta por silicatos de origem natural.

Observa-se também a presença de fases associadas à hidratação, como a portlandita e o silicato de cálcio hidratado, além de carbonatos. A detecção dessas fases sugere que a argamassa polimérica estudada pode conter adições minerais cimentícias em sua formulação.

Com o fim de identificar os grupos funcionais e, por extensão, os componentes químicos presentes na argamassa polimérica, foi realizada a análise de espectroscopia por absorção no infravermelho (Figura 4.6).

**Figura 4.6** – Argamassa polimérica: espectro de absorção no infravermelho.

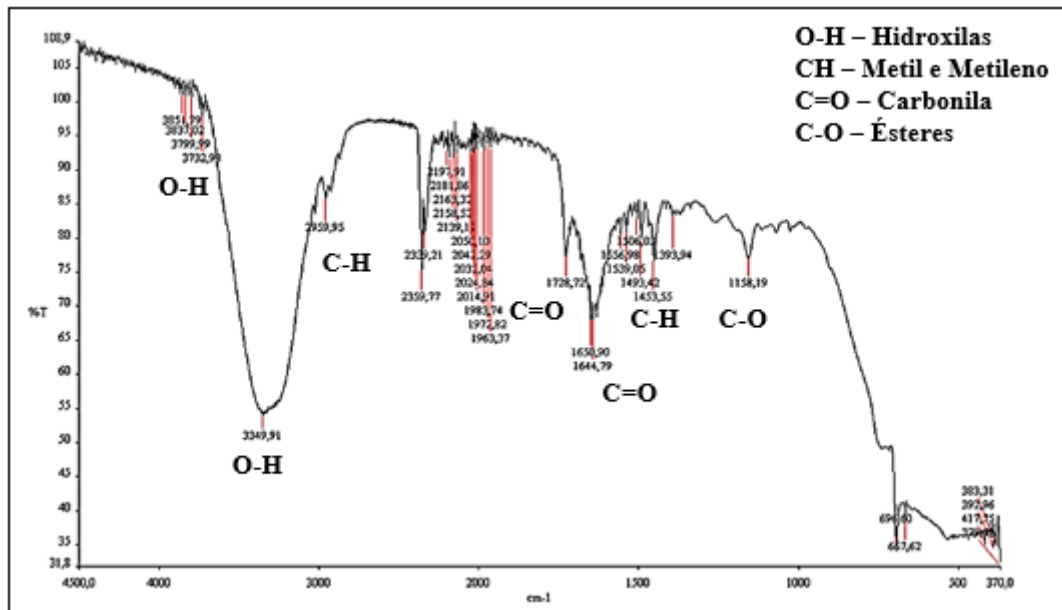


A análise por espectroscopia por absorção no infravermelho confirma que a argamassa é um material compósito contendo uma matriz polimérica orgânica (acrílica ou acetato) e componentes inorgânicos à base de silicatos, que são o material de carga ou *filler*.

#### 4.1.4 Cola acrílica

Assim como a argamassa polimérica, a cola acrílica foi submetida ao ensaio de espectroscopia por absorção no infravermelho. A Figura 4.7 mostra o espectro de absorção do material.

Figura 4.7 – Cola acrílica: espectro de absorção no infravermelho.



O espectro da cola acrílica é consistente com a composição de um material de natureza polimérica orgânica, sem os agregados inorgânicos presentes em argamassas (ausência de picos fortes de silicato). A banda de éster acrílico é a principal característica que a diferencia. A presença desta banda confirma que o polímero principal é um polímero acrílico, como o poli-acrilato de etila ou o poli-acrilato de butila.

#### 4.2 PRISMAS – COMPORTAMENTO MECÂNICO SOB CISALHAMENTO

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento dos prismas de alvenaria, segundo os diferentes materiais de assentamento e níveis de pré-compressão ( $\sigma_c$ ). Conforme exposto anteriormente, para o cálculo do módulo de cisalhamento ( $G$ ) e das tensões de ruptura ( $\tau_{rup}$ ) optou-se pela utilização da área líquida das unidades. Tal decisão fundamenta-se nas evidências visuais dos modos de falha (Figura 4.20), que demonstraram que a ruptura do sistema não ocorreu somente por escorregamento plano na interface, mas por tração diagonal nos septos e paredes dos tijolos. Dessa forma, a área líquida representa com maior fidelidade a

seção efetiva que resistiu aos esforços, evitando a subestimativa das propriedades mecânicas dos materiais de assentamento.

#### 4.2.1 Módulo de cisalhamento ( $G$ )

O módulo de cisalhamento ( $G$ ) representa o comportamento elástico inicial da junta, sendo uma medida fundamental para a análise da deformabilidade estrutural. Por meio da técnica de Correlação de Imagens Digitais (DIC) foram obtidos os valores de deformação para cada tipo de prisma, ao longo dos ensaios de cisalhamento. A fim de analisar o comportamento mecânico das amostras, inicialmente foram elaborados gráficos de tensão-deformação para cada junta (esquerda e direita) dos prismas, resultando em um conjunto de seis curvas.

Para facilitar a análise e obter uma representação do comportamento médio de cada amostra, a média aritmética (em valores absolutos) das deformações de ambas as juntas foi calculada. Esse procedimento resultou na condensação dos dados em três curvas, uma para cada tipo de prisma. Os gráficos resultantes, assim como as imagens geradas pelo GOM *Correlate* durante a análise de deformações são apresentados nas Figuras B.1 a B.9 do Apêndice B.

Para determinar o módulo de cisalhamento, a análise dos dados foi restrita ao trecho correspondente ao comportamento elástico dos materiais. A relação tensão-deformação em juntas de alvenaria raramente apresenta linearidade perfeita até a ruptura, sendo o comportamento não linear influenciado pela microfissuração progressiva e pelo atrito entre os componentes (Gatta *et al.*, 2018). Dessa forma, para se obter um valor representativo do módulo de cisalhamento dos materiais, o ajuste linear foi realizado apenas no intervalo compreendido entre 0% e 30% da tensão de ruptura ( $\tau_{rup}$ ) determinada para cada nível de pré-compressão ( $\sigma_c$ ).

O limite de 30% da tensão de ruptura — também conhecido como limite de proporcionalidade — foi adotado de modo a garantir que a regressão linear representasse exclusivamente a fase elástica do comportamento da junta, na qual se assume que as tensões aplicadas não são altas o suficiente para causar danos permanentes à estrutura (Araújo, 2017; Evangelho, 2013; Scadelai, 2004).

Embora estudos anteriores indiquem que o comportamento não linear da alvenaria tende a se manifestar em percentuais mais elevados da resistência de pico (Costigan *et al.*, 2015; Jafari *et*

*al.*, 2019; Mohamad *et al.*, 2018; Thamboo *et al.*, 2020), neste trabalho adotou-se um limite mais conservador, fixado em 30% da tensão máxima.

Esse critério, estabelecido como valor de referência na NBR 8522-1 (ABNT, 2021) para a determinação do módulo de elasticidade tangente inicial de concretos, é igualmente empregado por diversos autores na avaliação dos módulos de elasticidade e cisalhamento em alvenarias (Chatterjee *et al.*, 2023; Cuadros-Rojas *et al.*, 2024; Estevan *et al.*, 2023; Guadagnuolo *et al.*, 2020; Gams *et al.*, 2023; Kaushik *et al.*, 2007; Lima, 2024; Oreb *et al.*, 2025; Saviano *et al.*, 2024; Truong *et al.*, 2019; Wiehle & Brinkmann, 2022).

Assim, o módulo de cisalhamento foi obtido a partir do coeficiente angular da reta ajustada ao trecho inicial da curva tensão-deformação de cada tipo de junta, conforme a Lei de Hooke generalizada para o cisalhamento (Equação 4.1).

$$\tau = G\gamma \quad (4.1)$$

Em que:  $\tau$  = tensão de cisalhamento (MPa);

$G$  = módulo de rigidez ou módulo de cisalhamento (MPa);

$\gamma$  = deformação por cisalhamento ou deformação angular.

É importante destacar que o módulo de cisalhamento é uma propriedade intrínseca do material, pois mede a resistência interna à deformação por cisalhamento, sendo independente da geometria da junta. Já a rigidez é uma propriedade extrínseca (ou global), pois descreve a resistência da estrutura ou elemento à deformação sob carga, dependendo tanto do módulo de cisalhamento do material quanto das dimensões do elemento (Nichols, 2000; Teixeira; Ribeiro, 2012).

No contexto deste trabalho, o termo “rigidez” foi utilizado de forma abrangente para referir-se ao desempenho elástico das juntas. Embora o módulo  $G$  tenha sido o parâmetro medido, o termo rigidez foi empregado nas discussões a fim de simplificar e comunicar o conceito de desempenho global da junta na fase elástica, já que, para fins de comparação prática entre os materiais de assentamento, a espessura das juntas foi mantida em um intervalo reduzido de 1

mm a 2,5 mm, permitindo sua classificação como juntas finas, de acordo com os padrões normativos internacionais anteriormente citados. A Tabela 4.5 apresenta os valores individuais e médios de  $G$ , conforme os níveis de pré-compressão e os tipos de amostra.

**Tabela 4.5** – Resultados individuais e médios do módulo de cisalhamento ( $G$ ) das juntas.

$\sigma_c$ (MPa)	Amostra	$G$ (MPa)	$G_{\text{médio}}$ (MPa)	$dp$ (MPa)	CV (%)
0,1	P <sub>AC1</sub>	127,95	222,08	81,97	36,91
	P <sub>AC2</sub>	277,71			
	P <sub>AC3</sub>	260,58			
	P <sub>AP1</sub>	235,53	219,97	56,18	25,54
	P <sub>AP2</sub>	266,73			
	P <sub>AP3</sub>	157,65			
	P <sub>CA1</sub>	73,75	106,51	29,12	27,34
	P <sub>CA2</sub>	129,46			
	P <sub>CA3</sub>	116,31			
0,3	P <sub>AC4</sub>	358,96	246,53	97,39	39,50
	P <sub>AC5</sub>	188,95			
	P <sub>AC6</sub>	191,67			
	P <sub>AP4</sub>	156,65	147,07	39,87	27,11
	P <sub>AP5</sub>	89,32			
	P <sub>AP6</sub>	127,93			
	P <sub>CA4</sub>	66,69	149,13	43,11	28,91
	P <sub>CA5</sub>	47,63			
	P <sub>CA6</sub>	86,30			
0,5	P <sub>AC7</sub>	204,20	276,20	158,58	57,41
	P <sub>AC8</sub>	458,01			
	P <sub>AC9</sub>	166,39			
	P <sub>AP7</sub>	417,65	241,44	155,72	64,50
	P <sub>AP8</sub>	122,31			
	P <sub>AP9</sub>	184,38			
	P <sub>CA7</sub>	75,85	125,19	42,72	34,12
	P <sub>CA8</sub>	149,64			
	P <sub>CA9</sub>	150,05			

Conforme a Tabela 4.6, a análise de variância do módulo de cisalhamento, corrigido pela área líquida, confirmou que apenas o fator *material* teve efeito estatisticamente significativo ( $p = 0,008$ ). A *pré-compressão* ( $p = 0,298$ ) e a *interação* ( $p = 0,829$ ) não se mostraram significativas, corroborando que o módulo de cisalhamento é uma propriedade intrínseca dos materiais e não foi alterada pela tensão de compressão perpendicular às juntas.

O teste de Tukey revelou um agrupamento estatístico distinto para a rigidez média. As juntas AC foram significativamente mais rígidas que as juntas CA ( $p = 0,007$ ), enquanto as juntas AP mostraram um comportamento intermediário, estatisticamente indistinguível tanto do grupo “A” de alta rigidez (AP vs. AC, com  $p = 0,442$ ), quanto do grupo “B” de baixa rigidez (AP vs. CA, com  $p = 0,088$ ).

**Tabela 4.6** – Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para G.

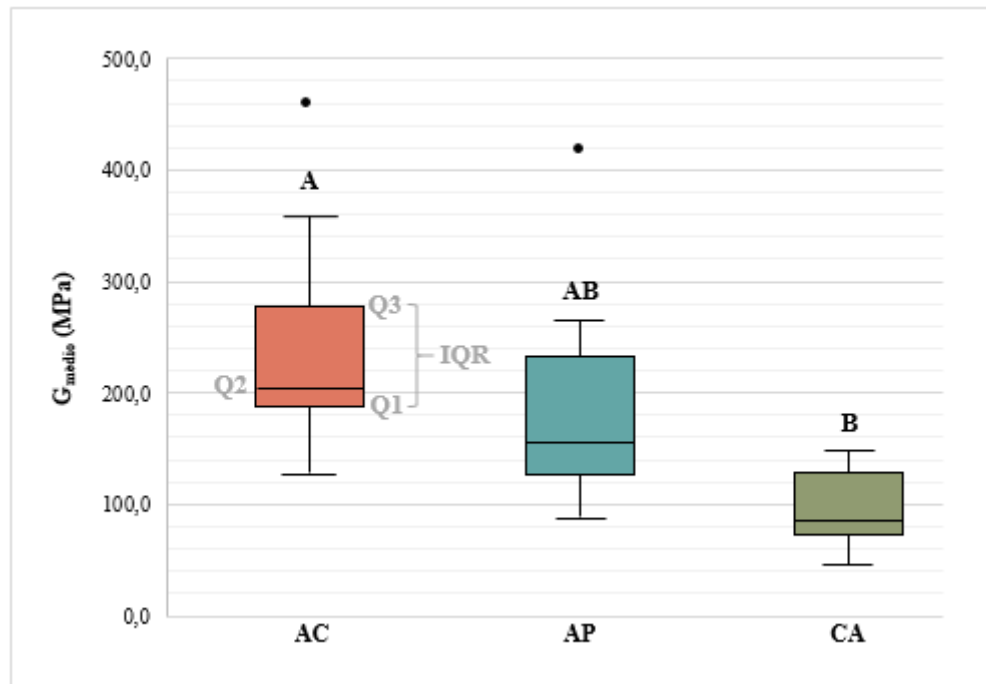
ANOVA	Efeito sobre a variável (G)	Teste de Tukey	Implicação estatística	Agrupamento
<i>Material</i> ( $p = 0,008$ )	Significativo	AC vs. CA ( $p = 0,007$ )	D	AC (A)
<i>Pré-compressão</i> ( $p = 0,298$ )	Não significativo	AC vs. AP ( $p = 0,442$ )	ND	AP (AB)
<i>Interação</i> ( $p = 0,829$ )	Não significativo	AP vs. CA ( $p = 0,088$ )	ND	CA (B)

Nota: D – Diferem; ND – Não diferem. (A) – Alta rigidez; (B) – Baixa rigidez.

Baseando-se diretamente na ANOVA, segundo a qual o fator *pré-compressão* não influenciou significativamente o valor do módulo G, foi calculado o módulo de cisalhamento médio ( $G_{\text{médio}}$ ) para cada tipo de junta (AC, AP e CA) utilizando-se os resultados dos nove prismas assentados com cada tipo de material, desconsiderando-se o nível de  $\sigma_c$  aplicado durante os ensaios. Este procedimento de agrupamento permitiu isolar o efeito principal (*material*), que de fato governou a rigidez inicial das juntas. A aplicação subsequente do teste de Tukey foi realizada apenas sobre esse fator, garantindo uma análise precisa da hierarquia de rigidez intrínseca das juntas.

Conforme o diagrama de caixa (*boxplot*) da Figura 4.8, as juntas AC e AP apresentaram os valores mais altos de rigidez, conforme indicado pelas suas medianas ( $Q_2$ ), mas também exibiram a maior dispersão dos resultados. Esta variabilidade é evidenciada pela maior amplitude do intervalo interquartil ( $IQR$ ), que delimita os 50% centrais dos dados, entre o primeiro quartil ( $Q_1$ ) e o terceiro quartil ( $Q_3$ ). As hastes longas confirmam essa heterogeneidade, indicando uma variação considerável tanto nos resultados 25% superiores, quanto nos resultados 25% inferiores da amostra.

**Figura 4.8** – Distribuição estatística e variabilidade do módulo de cisalhamento ( $G$ ) para as diferentes juntas.



A Tabela 4.7 apresenta a estatística descritiva detalhada para o módulo  $G$ . Observa-se que, embora as médias indiquem uma hierarquia numérica de rigidez ( $AC > AP > CA$ ), o elevado desvio-padrão e o coeficiente de variação nos grupos cimentícios justificam a sobreposição estatística observada no teste de Tukey, que classificou as juntas AP como um grupo de transição (AB).

**Tabela 4.7** – Estatística descritiva e coeficientes de variação para o módulo de cisalhamento ( $G$ ) das juntas.

	Média (MPa)	Mediana (Q2) (MPa)	dp (MPa)	CV (%)	Valor mínimo (MPa)	Valor máximo (MPa)	IQR (MPa)
AC	248,27	204,20	104,35	42,03	127,95	458,01	88,76
AP	195,35	157,65	100,18	51,28	89,32	417,65	107,60
CA	99,52	86,30	37,77	37,95	47,63	150,05	55,71

A presença de valores atípicos (*outliers*), representados pelos pontos isolados no gráfico, indica dados situados a uma distância superior a 1,5 vezes o *IQR*. Para as juntas AC, a média (248,27 MPa) posiciona-se acima da mediana (204,20 MPa), confirmando que esses *outliers* superiores deslocaram a tendência central para cima.

Tais desvios sugerem que, em uma parcela restrita dos prismas, a interação entre a superfície do tijolo e a argamassa favoreceu uma rigidez elevada, desviando-se do padrão da maioria das amostras. Em contraste, as juntas CA, apesar de apresentarem a rigidez média mais baixa, exibiram a maior consistência de desempenho, com um diagrama de caixa visivelmente mais compacto e o menor *IQR* do estudo.

A elevada rigidez das juntas de argamassa colante está associada à sua matriz cimentícia que, após a hidratação, forma uma estrutura cristalina rígida. Por outro lado, a menor rigidez das juntas de cola acrílica correlaciona-se à sua natureza polimérica, que confere um comportamento viscoelástico e maior flexibilidade à interface, resultando em um sistema mais deformável no regime elástico.

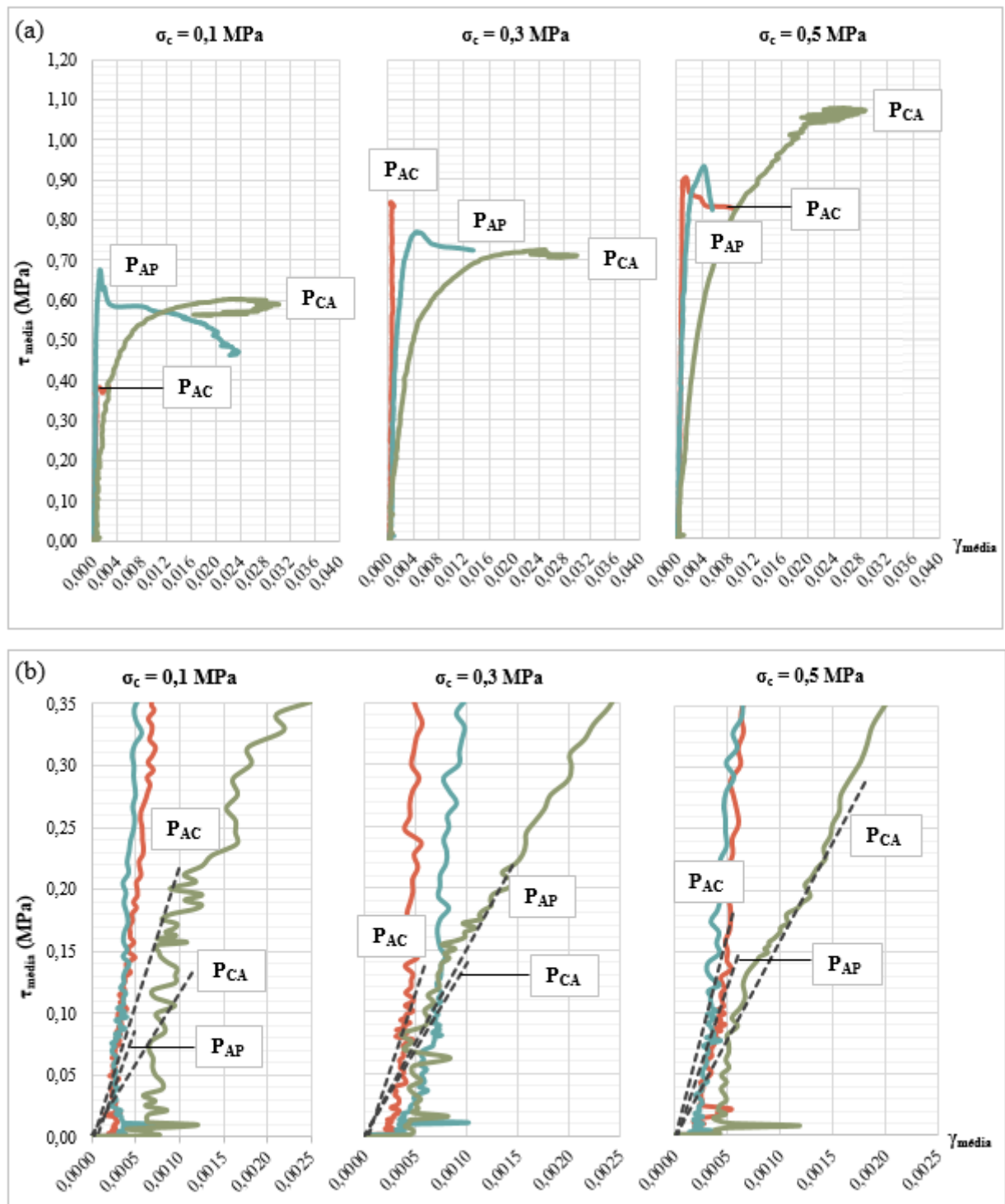
A Figura 4.9 (a) apresenta as curvas médias de tensão de cisalhamento ( $\tau_{\text{média}}$ ) em função da deformação de cisalhamento ( $\gamma_{\text{média}}$ ) para cada tipo de junta, sob os diferentes níveis de  $\sigma_c$ . A Figura 4.9 (b) mostra a inclinação inicial das curvas, que representa o módulo de cisalhamento ( $G$ ).

De forma consistente, as amostras  $P_{CA}$  apresentaram a menor inclinação, indicando baixa rigidez, enquanto as amostras  $P_{AC}$  e  $P_{AP}$  exibiram maior rigidez inicial em todos os níveis de  $\sigma_c$ . As curvas das amostras  $P_{CA}$  apresentaram um longo patamar de deformação após a fase elástica, especialmente sob níveis baixos e intermediários de compressão. Este comportamento confirma a maior capacidade de deformação (maior  $\gamma_{\text{rup}}$ ) das juntas CA, caracterizando-as como juntas mais dúcteis, conforme a conclusão da ANOVA (Seção 4.2.2).

Essa ductilidade está ligada à natureza polimérica da cola acrílica. A presença de resinas orgânicas, identificadas via espectroscopia por absorção no infravermelho (Figura 4.7 e Quadro A.7) permitiu que as juntas assentadas com esse material suportassem maiores deformações antes da falha total, alterando o mecanismo de ruptura de uma fratura de interface brusca para uma deformação interna das juntas.

Destaca-se que as curvas tensão-deformação (Figura 4.9) devem ser consideradas apenas para fins de visualização do comportamento mecânico das amostras. Para as análises estatísticas, foram utilizados os valores de  $G$  calculados com base nas tensões máximas de ruptura individuais dos prismas.

**Figura 4.9** – Módulo de cisalhamento médio: (a) curvas médias  $\tau$  vs.  $\gamma$ ; (b) detalhe da inclinação do trecho inicial das curvas.



#### 4.2.2 Deformação de ruptura por cisalhamento ( $\gamma_{\text{rup}}$ )

A deformação de ruptura por cisalhamento ( $\gamma_{\text{rup}}$ ) representa a capacidade de deformação plástica da junta antes da falha, sendo um indicador de sua ductilidade. A Tabela 4.8 apresenta os

resultados individuais e médios de  $\gamma_{rup}$ . Esses valores representam as deformações angulares capturadas via DIC em toda a área de interesse (AOI) das juntas. Enquanto os mapas de deformação (campos de *Average Strain*) mostram picos localizados de deformação onde a fissura se inicia, a  $\gamma_{rup}$  quantifica a capacidade global de acomodação da junta no instante imediatamente anterior à perda total de aderência. Essa correlação permite validar os campos visuais da DIC como indicadores precisos da iminência de ruptura.

Segundo a ANOVA, assim como para o módulo  $G$ , apenas o fator *material* teve um efeito estatisticamente significativo ( $p < 0,001$ ) sobre a deformação de ruptura. O fator *pré-compressão* ( $p = 0,856$ ) e o termo de *interação* ( $p = 0,567$ ) foram irrelevantes para a deformação máxima. Esse resultado demonstra que essa também é uma propriedade intrínseca dos materiais, sendo inalterável pela aplicação da tensão normal.

**Tabela 4.8** – Resultados individuais e médios da deformação de ruptura ( $\gamma_{rup}$ ) das juntas.

$\sigma_c$ (MPa)	Amostra	$\gamma_{rup}$	$\gamma_{rup}$ , média	dp	CV (%)
0,1	P <sub>AC1</sub>	0,000751			
	P <sub>AC2</sub>	0,002830	0,00142	0,0012	84,45
	P <sub>AC3</sub>	0,000683			
	P <sub>AP1</sub>	0,001752			
	P <sub>AP2</sub>	0,000934	0,00138	0,0004	29,05
	P <sub>AP3</sub>	0,001445			
	P <sub>CA1</sub>	0,025121			
	P <sub>CA2</sub>	0,019677	0,02654	0,0077	29,01
	P <sub>CA3</sub>	0,034815			
0,3	P <sub>AC4</sub>	0,000983			
	P <sub>AC5</sub>	0,000320	0,00053	0,0004	74,91
	P <sub>AC6</sub>	0,000300			
	P <sub>AP4</sub>	0,004034			
	P <sub>AP5</sub>	0,004217	0,00478	0,0011	23,01
	P <sub>AP6</sub>	0,006092			
	P <sub>CA4</sub>	0,031758			
	P <sub>CA5</sub>	0,017837	0,02340	0,0074	31,62
	P <sub>CA6</sub>	0,020609			
0,5	P <sub>AC7</sub>	0,001233			
	P <sub>AC8</sub>	0,000438	0,00108	0,0006	55,40
	P <sub>AC9</sub>	0,001577			
	P <sub>AP7</sub>	0,002802			
	P <sub>AP8</sub>	0,003023	0,00348	0,0010	28,71
	P <sub>AP9</sub>	0,004624			
	P <sub>CA7</sub>	0,015577			
	P <sub>CA8</sub>	0,025813	0,02174	0,0054	24,84
	P <sub>CA9</sub>	0,023830			

A Tabela 4.9 apresenta os resultados do teste ANOVA e do teste de Tukey para o fator *material*. As amostras P<sub>CA</sub> apresentaram capacidade de deformação (ductilidade) superior às amostras P<sub>AC</sub> e P<sub>AP</sub>. Este resultado é consistente com o baixo módulo de cisalhamento das juntas de cola acrílica, indicando que esse tipo de junta é menos rígida, com alta capacidade de acomodar grandes deformações. Por outro lado, em relação à ductilidade, as juntas de argamassa colante e polimérica não apresentaram diferença significativa entre si.

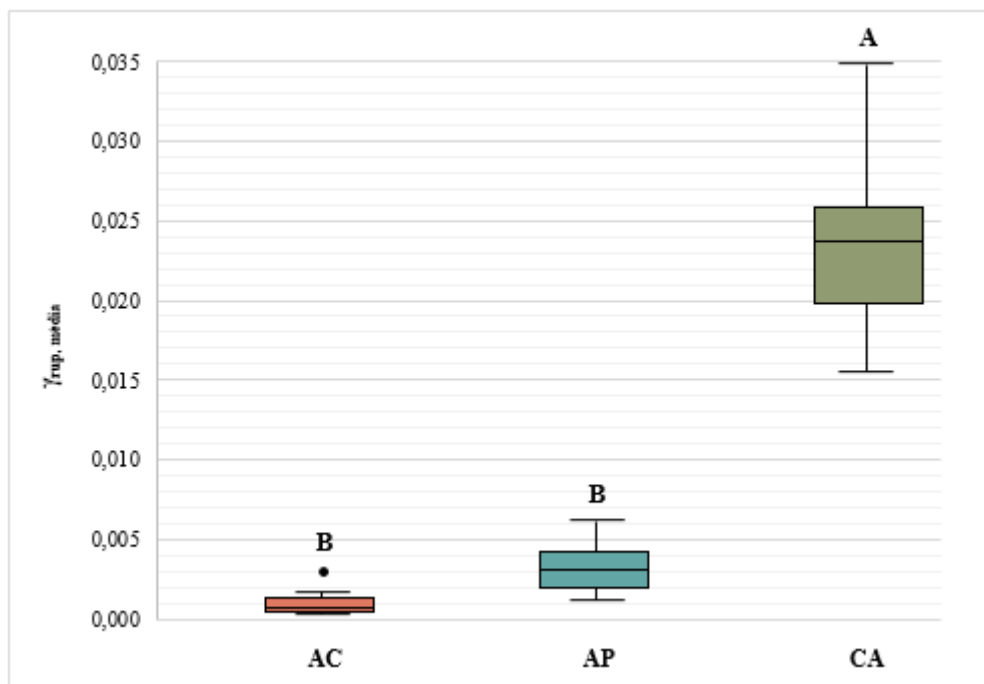
**Tabela 4.9** – Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para  $\gamma_{rup}$ .

ANOVA	Efeito sobre a variável ( $\gamma_{rup}$ )	Teste de Tukey	Implicação estatística	Agrupamento
<i>Material</i> ( $p < 0,001$ )	Significativo	AC vs. CA ( $p < 0,001$ )	D	AC (B)
<i>Pré-compressão</i> ( $p = 0,856$ )	Não significativo	AC vs. AP ( $p = 0,494$ )	ND	AP (B)
<i>Interação</i> ( $p = 0,567$ )	Não significativo	AP vs. CA ( $p < 0,001$ )	D	CA (A)

Nota: D – Diferem; ND – Não diferem. (A) – Alta ductilidade; (B) – Baixa ductilidade.

O teste de Tukey resultou em um agrupamento com as juntas CA pertencendo ao grupo "A" de alta ductilidade, enquanto as juntas AC e AP compõem o grupo "B" de baixa ductilidade. A Figura 4.10 apresenta o *boxplot* para a deformação de ruptura, evidenciando comportamentos distintos entre os tipos de juntas.

**Figura 4.10** – Distribuição estatística e variabilidade da deformação de ruptura ( $\gamma_{rup}$ ) para as diferentes juntas.



Enquanto os conjuntos de dados das juntas AC e AP se concentram na base do gráfico, com baixas medianas e reduzida dispersão, as juntas CA apresentam a mediana mais elevada e a maior amplitude de distribuição. A variabilidade nas juntas CA é evidenciada pelo maior *IQR*. Este resultado contrasta com os índices de rigidez (*G*), onde as juntas de cola acrílica haviam mostrado maior consistência, sugerindo que, embora a rigidez inicial desse tipo de junta seja previsível, o seu ponto exato de ruptura é variável.

A Tabela 4.10 detalha as propriedades estatísticas da deformação. Os valores confirmam que a dispersão nas juntas CA é numericamente superior em termos absolutos, com um *IQR* de 0,0061.

**Tabela 4.10** – Estatística descritiva e coeficientes de variação da deformação de ruptura ( $\gamma_{rup}$ ) das juntas.

	<b>Média (MPa)</b>	<b>Mediana (Q2) (MPa)</b>	<b>dp (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Valor mínimo (MPa)</b>	<b>Valor máximo (MPa)</b>	<b><i>IQR</i> (MPa)</b>
<b>AC</b>	0,0010	0,0008	0,0008	79,34	0,0003	0,0028	0,0008
<b>AP</b>	0,0032	0,0030	0,0017	52,32	0,0009	0,0061	0,0025
<b>CA</b>	0,0239	0,0238	0,0063	26,50	0,0156	0,0348	0,0061

Nota-se que, apesar de as juntas AC apresentarem o menor *IQR* visual no *boxplot*, seu coeficiente de variação atingiu 79,34%. Este fenômeno decorre da reduzida magnitude nominal das deformações deste material de assentamento (média de 0,0010). Nesses casos, pequenas oscilações experimentais tornam-se percentualmente significativas em relação à média. Em contrapartida, as juntas CA, embora tenham mostrado maior amplitude absoluta de deformação, apresentaram o menor CV do estudo (26,50%), o que indica maior consistência e estabilidade no comportamento dúctil desse material.

Fisicamente, a ductilidade superior das juntas CA correlaciona-se à natureza polimérica da cola. Ao contrário da matriz rígida e cristalina da argamassa colante, os polímeros acrílicos permitem o escorregamento molecular interno e a redistribuição de tensões ao longo da interface. Esse comportamento justifica o longo patamar plástico observado nas curvas tensão-deformação. No entanto, uma fase plástica mais extensa permite que defeitos microscópicos, como vazios ou irregularidades na superfície dos tijolos, se manifestem de maneira não linear, afetando o momento da falha final (Morales, 2013). Esse fenômeno se traduz na extensão das hastes do *boxplot* para o grupo CA.

### 4.2.3 Tensão de ruptura por cisalhamento ( $\tau_{rup}$ )

A Tabela 4.11 mostra os valores individuais e médios da tensão de ruptura alcançados pelas amostras. A tensão de ruptura ( $\tau_{rup}$ ), que define a resistência máxima da junta de assentamento, demonstrou ser dependente das condições de ensaio.

**Tabela 4.11** – Resultados individuais e médios da tensão de ruptura ( $\tau_{rup}$ ) das juntas.

$\sigma_c$ (MPa)	Amostra	$\tau_{rup}$ (MPa)	$\tau_{rup, média}$ (MPa)	dp (MPa)	CV (%)
0,1	P <sub>AC1</sub>	0,4186	0,4243	0,0255	6,01
	P <sub>AC2</sub>	0,4062			
	P <sub>AC3</sub>	0,4482			
	P <sub>AP1</sub>	0,7043	0,7046	0,0647	9,18
	P <sub>AP2</sub>	0,6400			
	P <sub>AP3</sub>	0,7694			
	P <sub>CA1</sub>	0,6091	0,6084	0,0111	1,82
	P <sub>CA2</sub>	0,5969			
	P <sub>CA3</sub>	0,6191			
0,3	P <sub>AC4</sub>	0,8747	0,8647	0,0308	3,56
	P <sub>AC5</sub>	0,8893			
	P <sub>AC6</sub>	0,8301			
	P <sub>AP4</sub>	0,7881	0,7759	0,0235	3,03
	P <sub>AP5</sub>	0,7906			
	P <sub>AP6</sub>	0,7488			
	P <sub>CA4</sub>	0,7783	0,7409	0,0439	5,93
	P <sub>CA5</sub>	0,7520			
	P <sub>CA6</sub>	0,6924			
0,5	P <sub>AC7</sub>	1,0109	0,9226	0,0768	8,32
	P <sub>AC8</sub>	0,8858			
	P <sub>AC9</sub>	0,8712			
	P <sub>AP7</sub>	0,9162	0,9655	0,0430	4,45
	P <sub>AP8</sub>	0,9848			
	P <sub>AP9</sub>	0,9953			
	P <sub>CA7</sub>	0,9175	1,0968	0,1552	14,15
	P <sub>CA8</sub>	1,1880			
	P <sub>CA9</sub>	1,1850			

Conforme a Tabela 4.12, a ANOVA confirmou que o *material*, a *pré-compressão* e a *interação* entre esses fatores foram estatisticamente significativos para  $\tau_{rup}$  ( $p < 0,005$  para todos os fatores).

**Tabela 4.12** – Resultados da análise de variância (ANOVA) para a tensão de ruptura ( $\tau_{rup}$ ).

ANOVA	Efeito sobre a variável ( $\tau_{rup}$ )
<i>Material</i> ( $p < 0,034$ )	Significativo
<i>Pré-compressão</i> ( $p < 0,001$ )	Significativo
<i>Interação</i> ( $p < 0,001$ )	Significativo

Com o resultado da ANOVA indicando um efeito estatisticamente significativo de todos os fatores sobre a tensão de ruptura, procedeu-se ao teste de Tukey para a comparação múltipla das médias. Inicialmente, a análise do efeito principal foi realizada considerando-se o *material* e a *pré-compressão* isoladamente, a fim de avaliar a influência individual de cada fator sobre a  $\tau_{rup}$  (Tabela 4.13).

**Tabela 4.13** – Resultado do teste *post hoc* de Tukey para a tensão de ruptura ( $\tau_{rup}$ ): fatores isolados.

Material	Implicação estatística	Pré-compressão	Implicação estatística
AC vs. CA ( $p = 0,057$ )	ND	0,1 MPa vs. 0,3 MPa ( $p < 0,001$ )	D
AC vs. AP ( $p = 0,057$ )	ND	0,1 MPa vs. 0,5 MPa ( $p < 0,001$ )	D
AP vs. CA ( $p = 1,000$ )	ND	0,3 MPa vs. 0,5 MPa ( $p < 0,001$ )	D

**Nota:** D – Diferem; ND – Não diferem.

O agrupamento resultante do teste *post hoc* revelou que, ao se desconsiderar a influência da pré-compressão, todos os materiais de assentamento (AC, AP e CA) apresentaram resistência média estatisticamente equivalente. Este resultado impediu a diferenciação do desempenho das juntas com base apenas no tipo de material usado.

Além disso, o fator *pré-compressão* demonstrou que a resistência ao cisalhamento variou significativamente a cada incremento de  $\sigma_c$ , contudo, este resultado não esclareceu a influência dessa variação sobre cada material. Uma vez que os efeitos principais isolados não permitiram a distinção de um material mais resistente ou a avaliação detalhada do comportamento das juntas, a análise focou na *interação* (*material* vs. *pré-compressão*), que também havia se mostrado estatisticamente significativa ( $p < 0,001$ ).

Aplicou-se, então, o teste de Tukey sobre os 36 pares de interação, o que possibilitou desmembrar e identificar precisamente quais combinações de material e pré-compressão diferiram estatisticamente entre si. Essa etapa final foi essencial para avaliar a influência combinada dos fatores e determinar o desempenho real de cada junta em diferentes condições de carregamento (Tabela 4.14).

**Tabela 4.14** – Resultado do teste *post hoc* de Tukey para a tensão de ruptura ( $\tau_{rup}$ ): fator *interação*.

Teste de Tukey	Implicação estatística	Teste de Tukey	Implicação estatística
AC <sub>0,1</sub> MPa vs. AP <sub>0,1</sub> MPa ( $p = 0,002$ )	D	CA <sub>0,1</sub> MPa vs. AC <sub>0,5</sub> MPa ( $p < 0,001$ )	D
AC <sub>0,1</sub> MPa vs. CA <sub>0,1</sub> MPa ( $p = 0,064$ )	ND	CA <sub>0,1</sub> MPa vs. AP <sub>0,5</sub> MPa ( $p < 0,001$ )	D
AC <sub>0,1</sub> MPa vs. AC <sub>0,3</sub> MPa ( $p < 0,001$ )	D	CA <sub>0,1</sub> MPa vs. CA <sub>0,5</sub> MPa ( $p < 0,001$ )	D
AC <sub>0,1</sub> MPa vs. AP <sub>0,3</sub> MPa ( $p < 0,001$ )	D	AC <sub>0,3</sub> MPa vs. AP <sub>0,3</sub> MPa ( $p = 0,777$ )	ND
AC <sub>0,1</sub> MPa vs. CA <sub>0,3</sub> MPa ( $p < 0,001$ )	D	AC <sub>0,3</sub> MPa vs. CA <sub>0,3</sub> MPa ( $p = 0,405$ )	ND
AC <sub>0,1</sub> MPa vs. AC <sub>0,5</sub> MPa ( $p < 0,001$ )	D	AC <sub>0,3</sub> MPa vs. AC <sub>0,5</sub> MPa ( $p = 0,973$ )	ND
AC <sub>0,1</sub> MPa vs. AP <sub>0,5</sub> MPa ( $p < 0,001$ )	D	AC <sub>0,3</sub> MPa vs. AP <sub>0,5</sub> MPa ( $p = 0,652$ )	ND
AC <sub>0,1</sub> MPa vs. CA <sub>0,5</sub> MPa ( $p < 0,001$ )	D	AC <sub>0,3</sub> MPa vs. CA <sub>0,5</sub> MPa ( $p = 0,011$ )	D
AP <sub>0,1</sub> MPa vs. CA <sub>0,1</sub> MPa ( $p = 0,702$ )	ND	AP <sub>0,3</sub> MPa vs. CA <sub>0,3</sub> MPa ( $p = 0,999$ )	ND
AP <sub>0,1</sub> MPa vs. AC <sub>0,3</sub> MPa ( $p = 0,143$ )	ND	AP <sub>0,3</sub> MPa vs. AC <sub>0,5</sub> MPa ( $p = 0,217$ )	ND
AP <sub>0,1</sub> MPa vs. AP <sub>0,3</sub> MPa ( $p = 0,916$ )	ND	AP <sub>0,3</sub> MPa vs. AP <sub>0,5</sub> MPa ( $p = 0,052$ )	ND
AP <sub>0,1</sub> MPa vs. AC <sub>0,5</sub> MPa ( $p = 0,018$ )	D	CA <sub>0,3</sub> MPa vs. AC <sub>0,5</sub> MPa ( $p = 0,069$ )	ND
AP <sub>0,1</sub> MPa vs. AP <sub>0,5</sub> MPa ( $p = 0,004$ )	D	CA <sub>0,3</sub> MPa vs. AP <sub>0,5</sub> MPa ( $p = 0,014$ )	D
AP <sub>0,1</sub> MPa vs. CA <sub>0,5</sub> MPa ( $p < 0,001$ )	D	CA <sub>0,3</sub> MPa vs. CA <sub>0,5</sub> MPa ( $p < 0,001$ )	D
CA <sub>0,1</sub> MPa vs. AC <sub>0,3</sub> MPa ( $p = 0,004$ )	D	AC <sub>0,5</sub> MPa vs. AP <sub>0,5</sub> MPa ( $p = 0,996$ )	ND
CA <sub>0,1</sub> MPa vs. AP <sub>0,3</sub> MPa ( $p = 0,113$ )	ND	AC <sub>0,5</sub> MPa vs. CA <sub>0,5</sub> MPa ( $p = 0,090$ )	ND
CA <sub>0,1</sub> MPa vs. CA <sub>0,3</sub> MPa ( $p = 0,324$ )	ND	AP <sub>0,5</sub> MPa vs. CA <sub>0,5</sub> MPa ( $p = 0,335$ )	ND

Nota: D – Diferem; ND – Não diferem.

Conforme o teste *post hoc*, as juntas AC demonstraram um ganho de resistência ao cisalhamento significativo na transição da menor tensão de compressão (AC<sub>0,1</sub> MPa) para a tensão intermediária (AC<sub>0,3</sub> MPa). No entanto, o aumento subsequente da pré-compressão de 0,3 MPa para 0,5 MPa não resultou em um aumento estatisticamente significativo da resistência ( $p = 0,973$ ).

Esse resultado sugere que, para as juntas AC, a capacidade de mobilizar o atrito atingiu um patamar em  $\sigma_c = 0,3$  MPa e o aumento adicional da compressão não foi suficiente para gerar um ganho expressivo de resistência, acima da variabilidade dos dados. Fisicamente, a estabilização da resistência das juntas AC sugere que a matriz cimentícia, por ser mais rígida e cristalina, atingiu rapidamente o limite de mobilização da aderência mecânica superficial. O aumento adicional da compressão não resultou em maior intertravamento entre a argamassa e os poros dos tijolos de solo-cimento, limitando o ganho de resistência por atrito na interface.

As juntas AP demonstraram a menor sensibilidade estatística ao aumento da pré-compressão em toda a faixa de tensões. O teste de Tukey revelou que nem a transição de  $\sigma_c = 0,1$  MPa para  $\sigma_c = 0,3$  MPa, nem a de  $\sigma_c = 0,3$  MPa para  $\sigma_c = 0,5$  MPa resultaram em diferenças estatisticamente significativas na tensão de ruptura desse material. Esse comportamento indica que a resistência das juntas AP foi estabelecida por uma propriedade intrínseca do material de assentamento, sendo a contribuição da compressão perpendicular e consequente atrito, menos efetivos na ampliação da resistência, do que nos outros tipos de juntas.

Possivelmente, a composição mineral-polimérica deste material (Figura 4.6 e Quadro A.5) atuou como uma barreira, minimizando o contato direto com a rugosidade dos tijolos. Consequentemente, a contribuição do atrito puro para a resistência ao cisalhamento foi atenuada, tornando o desempenho mecânico deste tipo de junta mais dependente da integridade físico-química da argamassa, do que da compressão externa aplicada.

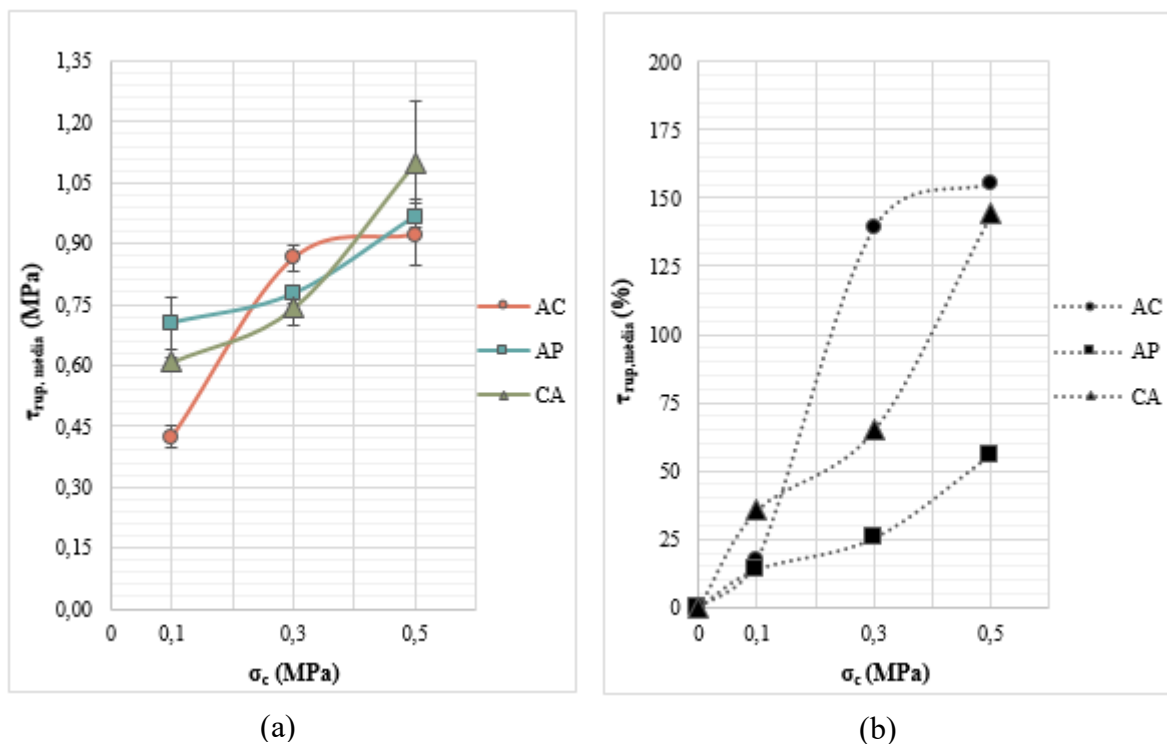
As juntas CA apresentaram um padrão de resposta distinto. Enquanto a transição de  $\sigma_c = 0,1$  MPa para  $\sigma_c = 0,3$  MPa não teve influência significativa sobre a tensão de ruptura, o aumento de  $\sigma_c = 0,3$  MPa para  $\sigma_c = 0,5$  MPa gerou um aumento significativo da resistência ( $p < 0,001$ ). Isso implica que a resistência desse tipo de junta foi dependente da pré-compressão em níveis mais elevados. Em outras palavras, a capacidade de ganho de resistência deste tipo de junta se manifestou apenas sob tensões de compressão mais altas.

Esse salto na resistência pode ser atribuído à natureza deformável da cola acrílica. Sob tensões elevadas, a matriz polimérica amorfa sofreu uma compressão que aumentou a área de contato efetiva entre a cola e o substrato, potencializando a aderência química e ativando mecanismos de atrito que permaneceram latentes em níveis de tensão inferiores. Esse fenômeno pode explicar o aumento abrupto na inclinação da curva de variação percentual média (Figura 4.11 (b)).

Em suma, sob a tensão de pré-compressão mais baixa (0,1 MPa), as juntas AP se destacaram, apresentando resistência estatisticamente superior às juntas AC ( $p = 0,002$ ) e semelhante às juntas CA ( $p = 0,702$ ). No entanto, sob os níveis intermediário (0,3 MPa) e alto (0,5 MPa) de pré-compressão, nenhuma das amostras apresentou diferenças estatisticamente significativas na resistência ao cisalhamento. As comparações pareadas nessas tensões demonstraram que, sob tensões de compressão mais elevadas, os três tipos de juntas convergiram para um patamar de resistência estatisticamente equivalente ( $p > 0,05$ ).

A Figura 4.11 (a) ilustra o comportamento da tensão média de ruptura em função do aumento da pré-compressão. Observa-se que as amostras AC foram beneficiadas pelo aumento da compressão, apresentando ganho significativo de resistência nos primeiros níveis de tensão. Em contrapartida, para as amostras CA, a contribuição da compressão para a resistência ao cisalhamento tornou-se estatisticamente relevante apenas no nível mais alto ( $\sigma_c = 0,5$  MPa). Para as juntas AP a resistência manteve-se estável, sem ganhos estatisticamente significativos com o aumento da pré-compressão, o que sugere que o desempenho deste tipo de junta é governado pela sua coesão inicial.

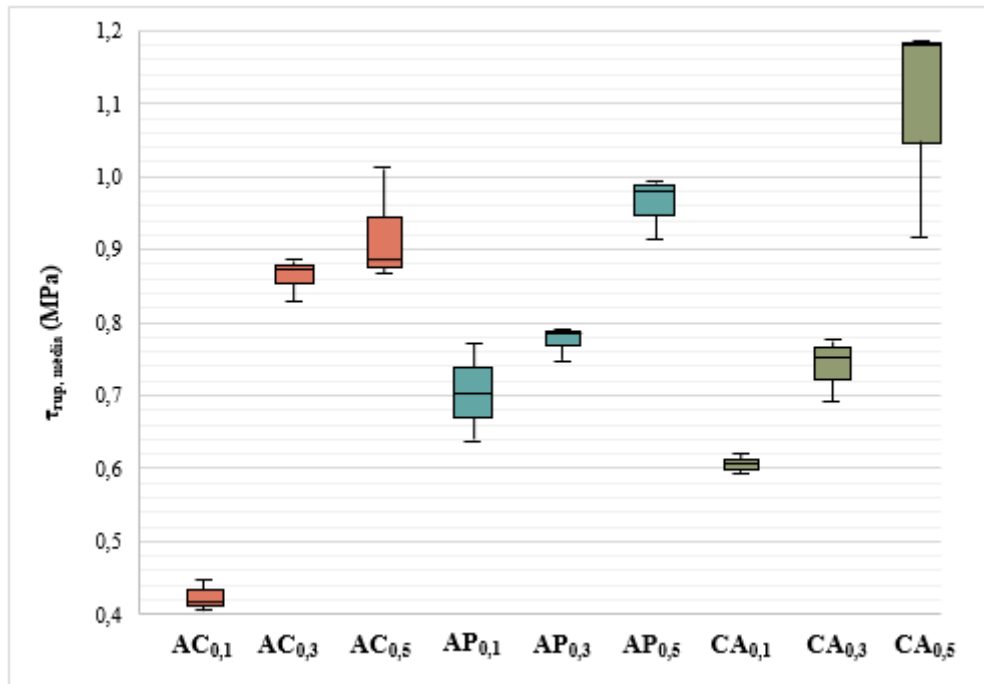
**Figura 4.11** – Influência da pré-compressão ( $\sigma_c$ ) sobre a resistência ao cisalhamento ( $\tau_{rup, média}$ ): (a) evolução dos valores absolutos e (b) variação percentual relativa à resistência inicial (coesão).



A análise da variação percentual (Figura 4.11 (b)) revelou a distinta sensibilidade de cada junta ao confinamento. As amostras AC demonstraram o maior ganho acumulado de resistência (155%). No entanto, as amostras CA, com um ganho percentual ligeiramente inferior (144%), apresentaram o comportamento mais abrupto no trecho final da curva, indicando uma sensibilidade crescente na transição de  $\sigma_c = 0,3$  MPa para  $\sigma_c = 0,5$  MPa.

Em contraste, as amostras AP mostraram-se menos dependentes da pré-compressão para resistir ao cisalhamento (ganho máximo de 55%), o que reforça o papel dominante da coesão sobre o comportamento desse material. O *boxplot* da Figura 4.12 confirma visualmente os padrões de significância identificados pelo teste de Tukey.

**Figura 4.12** – Distribuição estatística e variabilidade da tensão de ruptura ( $\tau_{rup}$ ) para as diferentes juntas.



Para as juntas AC, a resistência aumentou significativamente com o aumento da pré-compressão de 0,1 MPa para 0,3 MPa, mas a sobreposição das caixas em níveis superiores confirmou que o ganho adicional em  $\sigma_c = 0,5$  MPa não foi estatisticamente significativo ( $p = 0,973$ ). As juntas AP demonstraram a menor sensibilidade: as medianas ( $Q_2$ ) e os intervalos interquartis mantiveram-se em patamares próximos, com a variação em  $\sigma_c = 0,5$  MPa no limiar da não significância ( $p = 0,052$ ).

Em contraste, as juntas CA exibiram o aumento mais expressivo. A caixa referente a  $\sigma_c = 0,5$  MPa atingiu o nível mais alto de tensão do estudo, com uma mediana de 1,1850 MPa, sem

sobreposição com os limites do terceiro ( $Q3$ ) e primeiro ( $Q1$ ) quartis dos níveis anteriores. Este aumento confirma o resultado do teste de Tukey ( $p < 0,001$ ) para esta transição.

A Tabela 4.15 detalha as propriedades estatísticas para cada nível de carregamento. Verifica-se que o aumento da pré-compressão elevou a dispersão absoluta dos dados, especialmente no grupo  $CA_{0,5}$ , que apresentou o maior desvio-padrão (0,1553) e CV (14,16%) entre todas as amostras.

**Tabela 4.15** – Estatística descritiva e coeficientes de variação da tensão de ruptura ( $\tau_{rup}$ ) das juntas.

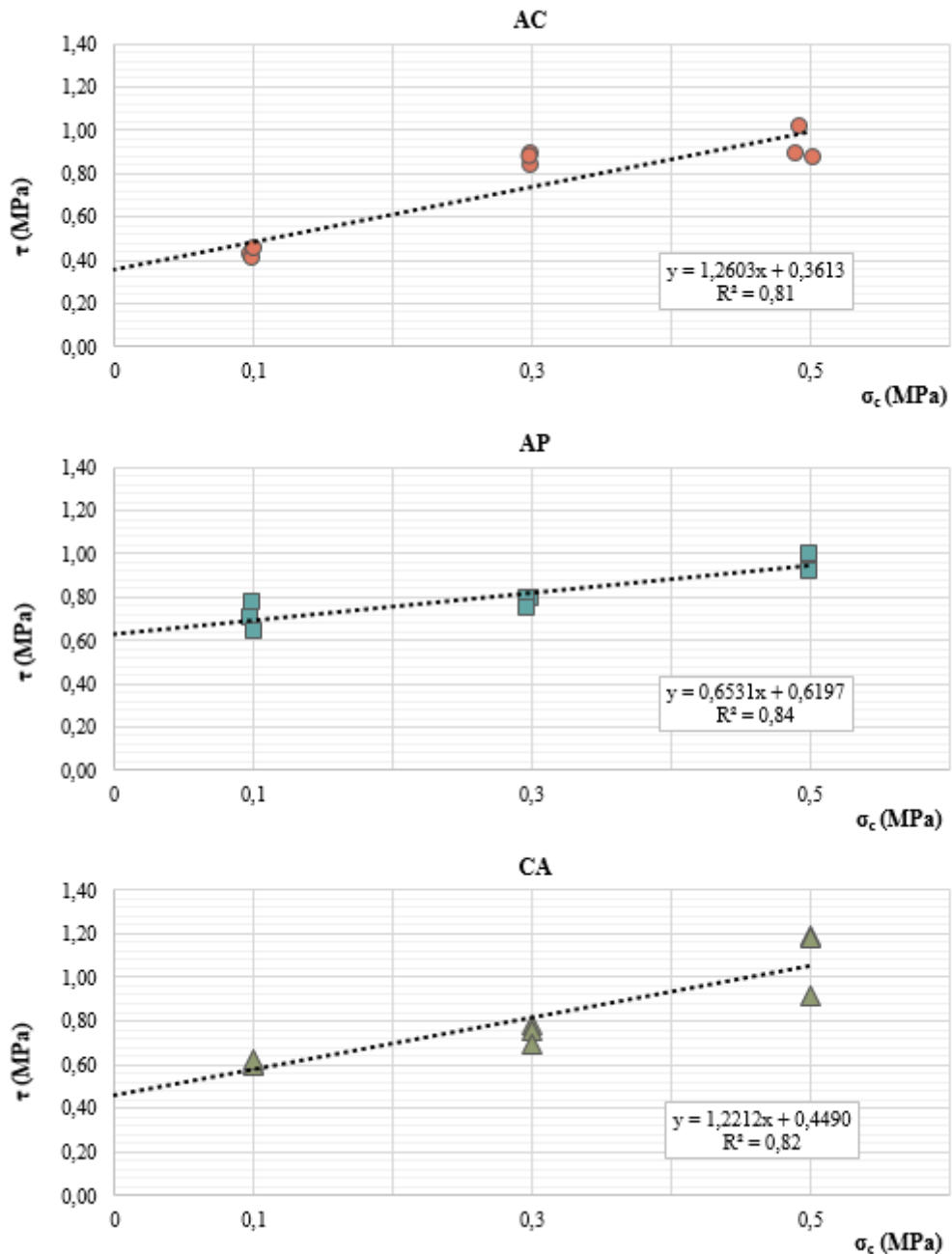
	<b>Média</b> <b>(MPa)</b>	<b>Mediana (Q2)</b> <b>(MPa)</b>	<b>dp</b> <b>(MPa)</b>	<b>CV</b> <b>(%)</b>	<b>Valor mínimo</b> <b>(MPa)</b>	<b>Valor máximo</b> <b>(MPa)</b>	<b>IQR</b> <b>(MPa)</b>
$AC_{0,1}$	0,4243	0,4186	0,0216	5,09	0,4062	0,4482	0,0210
$AC_{0,3}$	0,8647	0,8747	0,0308	3,56	0,8301	0,8893	0,0296
$AC_{0,5}$	0,9226	0,8858	0,0768	8,32	0,8712	1,0109	0,0698
$AP_{0,1}$	0,7046	0,7043	0,0647	9,18	0,6400	0,7694	0,0647
$AP_{0,3}$	0,7758	0,7881	0,0235	3,03	0,7488	0,7906	0,0209
$AP_{0,5}$	0,9655	0,9848	0,0430	4,45	0,9162	0,9953	0,0396
$CA_{0,1}$	0,6084	0,6091	0,0111	1,83	0,5969	0,6191	0,0111
$CA_{0,3}$	0,7409	0,7520	0,0440	5,94	0,6924	0,7783	0,0429
$CA_{0,5}$	1,0968	1,1850	0,1553	14,16	0,9175	1,1880	0,1352

Por fim, os dados confirmam que a partir da tensão de pré-compressão de 0,3 MPa, as resistências dos três tipos de juntas tornam-se estatisticamente equivalentes segundo o teste de Tukey. Essa convergência de desempenho torna-se ainda mais evidente no nível de  $\sigma_c = 0,5$  MPa, onde observa-se não apenas a equivalência estatística, mas também a sobreposição visual das caixas no *boxplot* (Figura 4.12), indicando que o efeito do confinamento equalizou a resistência ao cisalhamento, independentemente do material de assentamento utilizado. A análise da dispersão revela que, embora as médias tenham se tornado equivalentes a partir de  $\sigma_c = 0,3$  MPa, a natureza da variabilidade interna de cada grupo ainda apresenta particularidades ligadas à composição química de cada material.

#### 4.2.4 Parâmetros de resistência ao cisalhamento

Os parâmetros de coesão ( $c$ ) e de ângulo ou coeficiente de atrito ( $\text{tg}(\phi)$ ), que explicam o mecanismo de resistência das juntas sob cisalhamento, foram obtidos pela regressão linear dos dados de  $\tau$  vs.  $\sigma_c$ , resultantes dos ensaios (Figura 4.13).

**Figura 4.13** – Determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras AC, AP e CA.



A Tabela 4.16 resume os parâmetros obtidos para cada tipo de junta, acompanhados de seus respectivos erros padrão (SE). A análise demonstra que as juntas AP apresentaram a maior previsibilidade estatística, com os menores erros padrão, tanto para a coesão quanto para o coeficiente de atrito. Por outro lado, a maior magnitude do erro padrão observado para as juntas AC e CA nas estimativas de  $\text{tg}(\varphi)$  (0,23 e 0,21, respectivamente) reflete a sensibilidade dessas interfaces às imperfeições superficiais do substrato de solo-cimento, as quais se manifestaram de forma mais acentuada sob níveis elevados de pré-compressão.

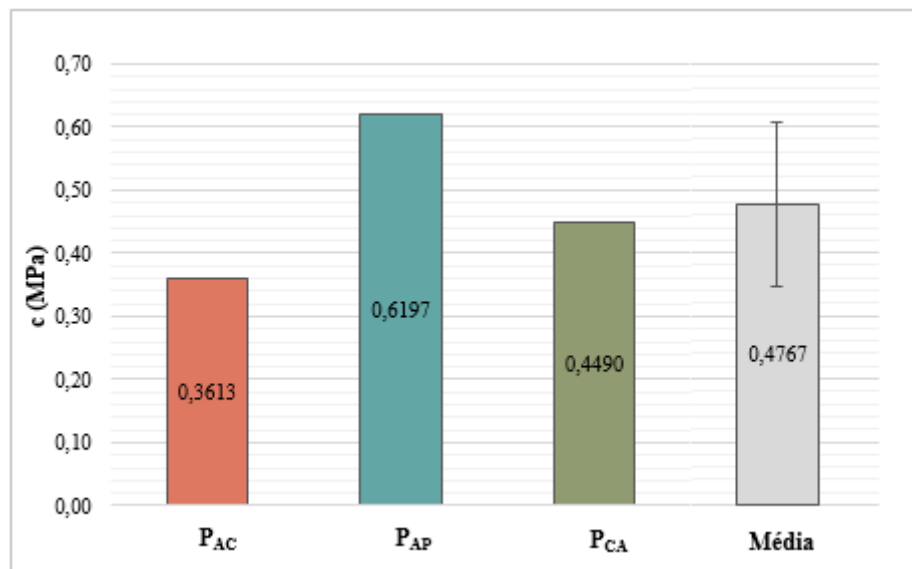
**Tabela 4.16** – Parâmetros de resistência ao cisalhamento das diferentes juntas.

Tipo de junta	$c$ (MPa)	SE (MPa)	$c_k$ (MPa)	$\text{tg}(\varphi)$	SE	$\text{tg}(\varphi)_k$	$R^2$
AC	0,36	0,08	0,28	1,26	0,23	1,01	0,81
AP	0,62	0,04	0,50	0,65	0,11	0,52	0,84
CA	0,45	0,07	0,36	1,22	0,21	0,98	0,82

Esses resultados corroboram a discussão sobre a dispersão dos dados experimentais, confirmando que o ajuste linear capturou a tendência central dos materiais, mantendo coeficientes de determinação ( $R^2$ ) adequados (acima de 0,81), apesar da variabilidade intrínseca ao sistema de juntas finas.

#### – Coesão ( $c$ )

A coesão das juntas, conforme os materiais de assentamento, pode ser visualmente comparada na Figura 4.14. Observa-se que as juntas AP apresentaram o valor mais alto de coesão ( $c = 0,6197$  MPa), seguidas pelas juntas CA ( $c = 0,4490$  MPa) e AC ( $c = 0,3613$  MPa).

**Figura 4.14** – Parâmetros de resistência ao cisalhamento: coesão ( $c$ ).

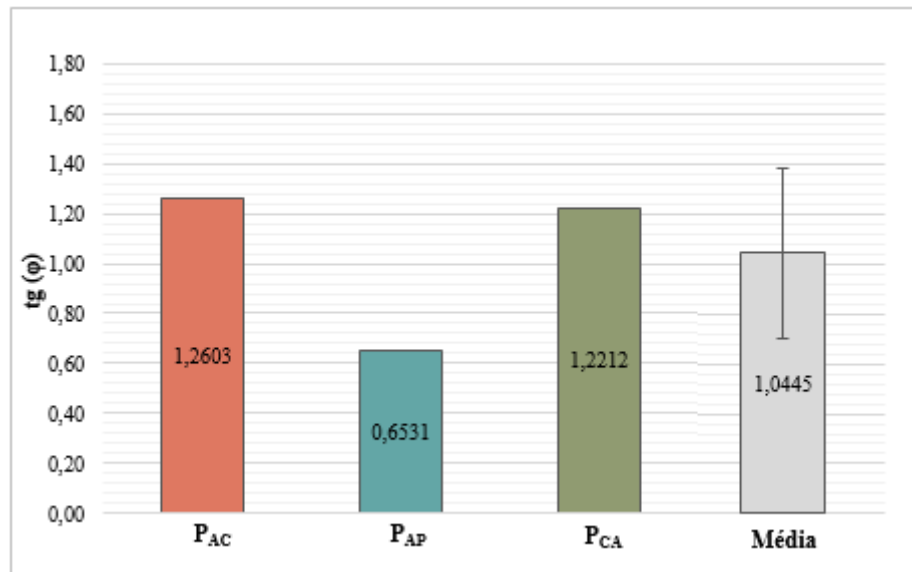
Conforme indicado pelas análises anteriores, a maior coesão das juntas AP indica que esse tipo de junta tem maior capacidade de garantir maior resistência inicial, na ausência de uma tensão

normal perpendicular. A alta coesão das juntas AP é consistente com a sua resistência superior em baixas tensões ( $\sigma_c = 0,1$  MPa), como demonstrado na Figura 4.11 (a).

– **Coefficiente de atrito ( $\text{tg}(\varphi)$ ):**

O coeficiente de atrito, que representa o ganho de resistência da junta em função do aumento da tensão normal, pode ser visto na Figura 4.15.

**Figura 4.15** – Parâmetros de resistência ao cisalhamento: coeficiente de atrito ( $\text{tg}(\varphi)$ ).



O coeficiente de atrito mais alto foi registrado pelas juntas AC ( $\text{tg}(\varphi) = 1,2603$ ), seguidas pelas juntas CA ( $\text{tg}(\varphi) = 1,2212$ ). As juntas AP apresentaram o valor mais baixo de atrito ( $\text{tg}(\varphi) = 0,6531$ ). Este resultado explica as conclusões da ANOVA de interação realizada para o parâmetro de resistência de ruptura ( $\tau_{rup}$ ). O baixo coeficiente de atrito das juntas AP explica porque seu ganho de resistência em função do aumento da pré-compressão foi o menor. Inversamente, as juntas AC e CA, com coeficientes de atrito mais altos, foram mais eficientes em traduzir o aumento da pré-compressão em aumento de resistência ao cisalhamento, com as juntas CA se beneficiando mais em altos níveis de compressão.

É importante notar que, embora o coeficiente de atrito tenha demonstrado uma dispersão absoluta superior em termos de desvio-padrão em comparação à coesão, esse parâmetro apresentou uma tendência de comportamento mais previsível entre os diferentes grupos. A análise dos parâmetros de Mohr-Coulomb indica que a coesão foi mais sensível à composição química do material de assentamento, variando significativamente entre as matrizes rígida (AC)

e polimérica (CA). Em contrapartida o coeficiente de atrito, apesar da sua variabilidade interna, tendeu a se estabilizar frente ao incremento da pré-compressão. Isso sugere que, em níveis elevados de carga vertical, o comportamento do sistema passou a ser governado predominantemente pelo contato mecânico e pelo intertravamento entre as superfícies dos materiais da interface.

Para contextualizar os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos neste trabalho, foi realizada uma comparação com os valores de coesão e de coeficiente de atrito constantes na norma europeia EN 1996-1-1 (CEN, 2020), na norma americana TMS 402-602 (2022) e na norma brasileira NBR 16868-1 (ABNT, 2020). Os resultados obtidos no presente estudo superaram os valores médios de referência estabelecidos pelas normas internacionais e pela norma nacional para alvenarias, conforme indica a Tabela 4.17.

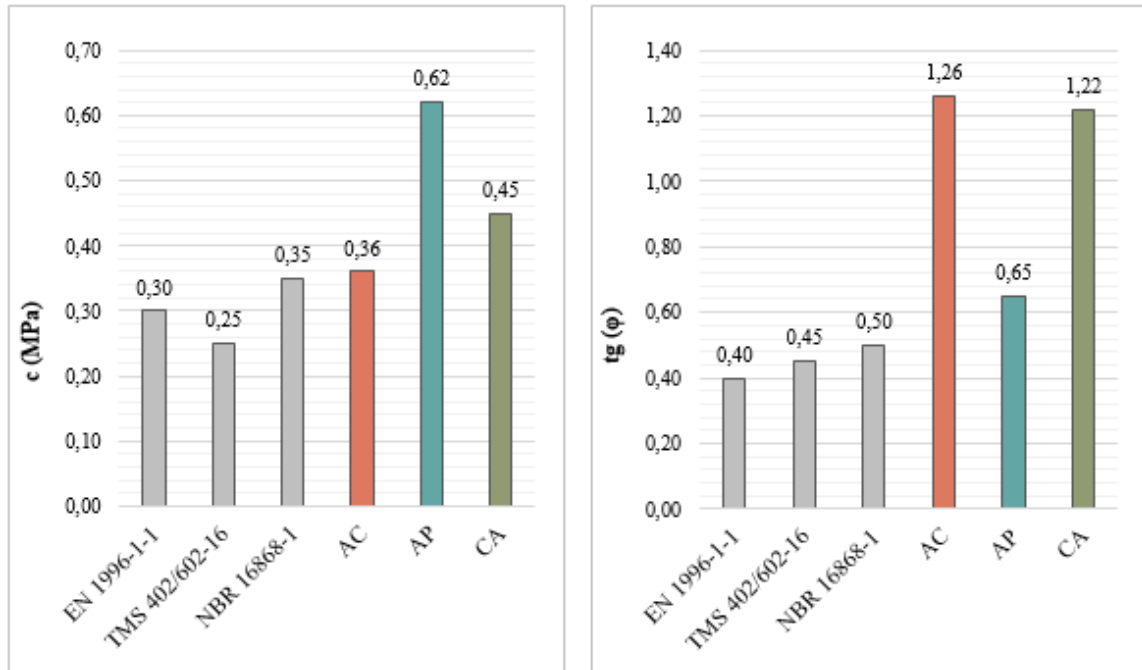
**Tabela 4.17** – Valores normativos para a coesão e para o coeficiente de atrito de juntas de alvenarias.

	Unidade	Juntas	$c$ (MPa)	$tg(\phi)$
EN 1996-1-1	Tijolos cerâmicos	Juntas finas (0,5 - 3 mm); argamassa de uso geral com resistência à compressão entre 1,0 MPa e 20 MPa	0,30	0,40
TMS 402/602-16	Tijolos cerâmicos/concreto	Alvenarias em amarração a meio tijolo; argamassa de cimento e cal; não-grauteadas	0,25	0,45
NBR 16868-1	Tijolos e blocos cerâmicos; blocos de concreto	Juntas com espessura de 10 mm; resistência média da argamassa à compressão acima de 7 MPa (composição não especificada)	0,35	0,50

Os valores de coesão obtidos para as juntas finas AC (0,36 MPa) e CA (0,45 MPa) superaram aos valores previstos pela norma europeia EN 1996-1-1 (0,30 MPa) e pela NBR 16868-1 (0,35 MPa). O maior destaque, contudo, foram as juntas AP que registraram uma coesão de 0,62 MPa. Este valor foi superior aos demais, incluindo a coesão de 0,25 MPa presente na norma americana TMS 402/602-16 e quase o dobro da coesão mínima referida na NBR 16868-1.

Em relação ao coeficiente de atrito, a diferença foi ainda mais pronunciada. Os coeficientes obtidos para as juntas AC (1,26) e CA (1,22) foram mais elevados que os coeficientes presentes nas normas, que variam de 0,40 (EN 1996-1-1) a 0,50 (NBR 16868-1). Este alto coeficiente de atrito indica que a resistência ao cisalhamento desses tipos de juntas aumenta de forma muito mais acentuada com o aumento da pré-compressão, do que o previsto pelos modelos normativos tradicionais. Em contraste, o coeficiente de atrito das juntas AP (0,65) foi o mais baixo entre as amostras do estudo, mas ainda assim superior aos valores normativos (Figura 4.16).

**Figura 4.16** – Parâmetros de resistência ao cisalhamento: comparação com os valores normativos.



Em resumo, o sistema de juntas finas empregado a tijolos de solo-cimento conferiu aos prismas uma resistência superior ao cisalhamento, tanto em termos de coesão, quanto em termos de aumento de atrito, em comparação com os parâmetros de projeto adotados nas normas. A Tabela 4.18 e as Figuras 4.17 e 4.18 permitem avaliar o desempenho das juntas AC, AP e CA frente a argamassas de assentamento tradicionais e especiais, cujos valores foram compilados de estudos da literatura, em que foram realizados ensaios de cisalhamento do tipo *triplet*.

A análise da coesão, revelou que os materiais de junta fina utilizados no presente estudo são competitivos com argamassas tradicionais (Figura 4.17). A coesão das juntas AC se alinhou a resultados da literatura para argamassas de cal e cimento. As juntas CA apresentaram coesão similar à de argamassas cimentícias tradicionais, o que demonstra sua capacidade de fornecer adesão de alto nível, apesar de serem constituídas por um material orgânico de junta fina.

As juntas AP registraram um valor de coesão superior ao de argamassas de cimento, cal e areia ou de cimento e areia, posicionando-se na extremidade superior da faixa de resultados. Em relação ao coeficiente de atrito, as juntas AC e CA superaram a maioria dos valores registrados na literatura (Figura 4.18). Os coeficientes de atrito das amostras AC e CA estão entre os mais altos, comparáveis apenas a algumas argamassas cimentícias tradicionais.

Tabela 4.18 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos em diferentes estudos.

(continua)

Autor(es)	Unidade	$f_t$ (MPa)	$A_c$ (mm <sup>2</sup> )	Argamassa	$R_c$ (MPa)	$R_f$ (MPa)	$e$ (mm)	$\sigma_c$ (MPa)	$c$ (MPa)	$tg(\varphi)$
[1] Zimmermann; Strauss (2011)	tijolos antigos (sólidos)	19,28	30.000 (250 × 120)	cimento, cal, pó de pedra, areia	2,62	0,73	–	0,17 – 2,17	0,21	0,709
[2] Wang; Heath; Walker (2013)	tijolos cerâmicos de engenharia (sólidos)	145,0	21.930 (215 × 102)	cal hidráulica pré-misturada	0,74	0,44	10	0,2; 0,6; 1	0,084	0,50
[3] Amiraslanzadeh <i>et al.</i> (2013)	tijolos cerâmicos (sólidos)	8,4	26.400 (240 × 110)	cimento:cal:areia = 1:1,14:4,93	9,7	0,75	–	0,0379 – 1,5152	0,36	0,72
[4] Pavan; Rao (2015)	tijolos cerâmicos (sólidos)	7,65	25.725 (245 × 105)	cimento:areia = 1:6	7,0	–	10	0 – 3	0,43	0,43
[5] Incerti; Rinaldini; Mazzotti (2016)	tijolos de argila	18,64	46.250 (250 × 185)	argamassa à base de cal hidráulica	1,4	0,43	–	0,03 – 0,25	0,27	0,358
[6] Ferretti <i>et al.</i> (2018)	tijolos de silicato de cálcio	–	21.828 (214 × 102)	argamassa cimentícia	–	–	10	0,2; 0,6; 1,2	0,13	0,499
				cimento:areia = 1:3	15,57	2,77			0,932	1,038
[7] Barattucci <i>et al.</i> (2020)	tijolos cerâmicos	–	22.037,5 (215 × 102,5)	cimento:areia = 1:6	6,06	1,44	10	0,2; 0,6; 1	0,796	1,016
				cimento:areia = 1:9	2,04	0,80			0,356	0,931

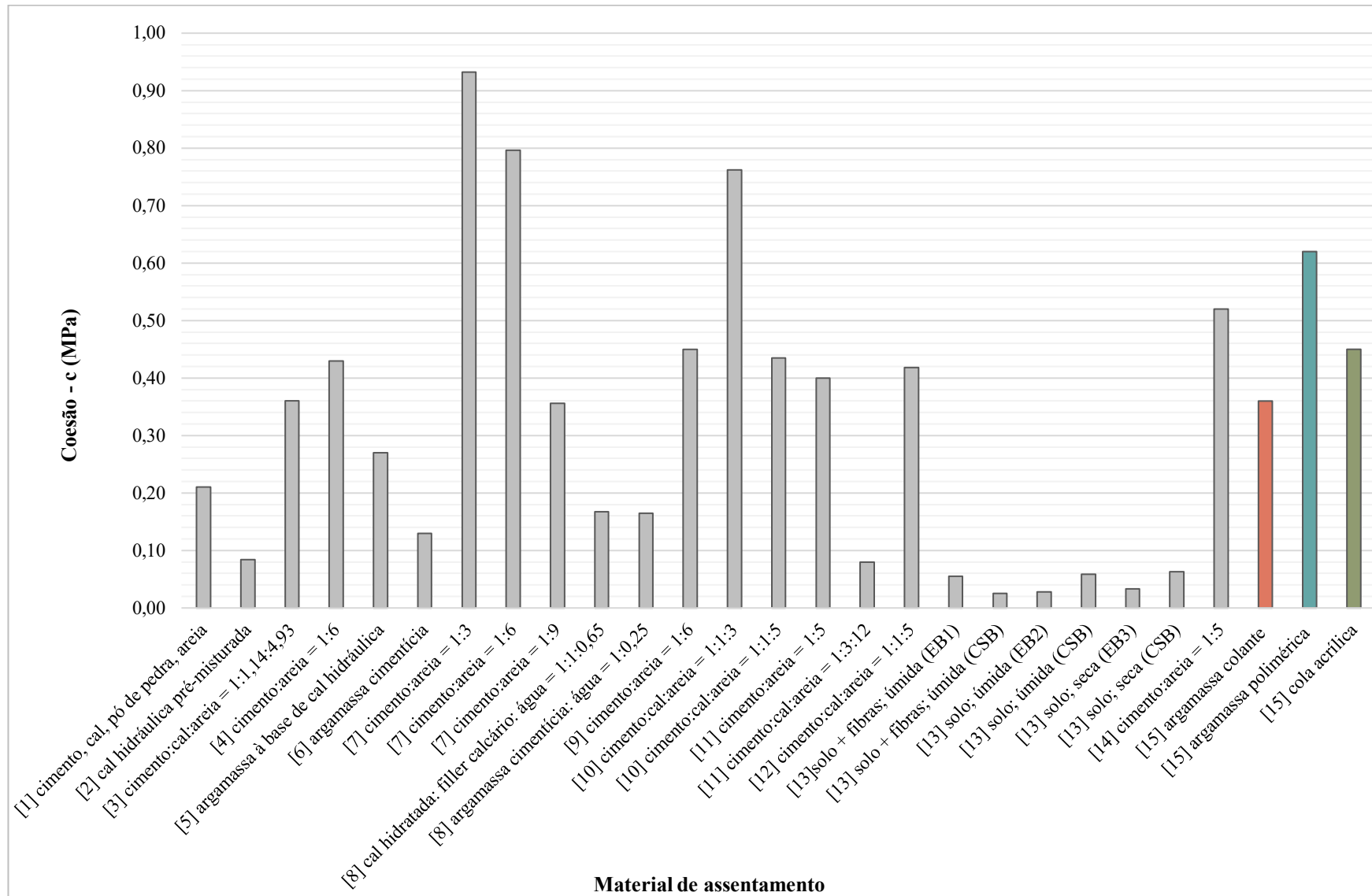
(continuação)

Autor(es)	Unidade	$f_t$ (MPa)	$A_c$ (mm <sup>2</sup> )	Argamassa	$R_c$ (MPa)	$R_f$ (MPa)	$e$ (mm)	$\sigma_c$ (MPa)	$c$ (MPa)	$tg(\varphi)$
[8] Segura <i>et al.</i> (2021)	tijolos de argila manufaturados (sólidos)	17,99	46.339 (311 × 149)	cal hidratada: filler calcário: água = 1:1:0,65	1,02	0,33		0,29; 0,58; 0,97	0,167	0,67
	tijolos de argila extrudados (sólidos)	27,93	34.290 (270 × 127)	argamassa cimentícia: água = 1:0,25	2,53	1,03	–	0,01 – 1,02	0,165	0,73
[9] Samiullah <i>et al.</i> (2022)	tijolos de argila (sólidos)	14,98	17.404 (229 × 76)	cimento:areia = 1:6	6,6	–	–	0,2; 0,6; 1	0,45	0,1134
[10] Hernoune <i>et al.</i> (2022)	tijolos perfurados	24,24	23.100 (220 × 105)	cimento:cal:areia = 1:1:3	7,187	3,341		0,2; 0,6; 1	0,762	0,57
				cimento:cal:areia = 1:1:5	3,643	1,453	10		0,435	1,04
[11] Demaj <i>et al.</i> (2022)	tijolos de argila antigos (sólidos)	25,30	25.300 (230 × 110)	cimento:areia = 1:5	13,8	3,40		0,2; 0,5; 0,7	0,40	1,57
	tijolos de argila novos (sólidos)	26,40	30.600 (255 × 120)	cimento:cal:areia = 1:3:12	1,0	0,50	–		0,08	0,70
[12] Hernoune; Herihiri (2023)	tijolos perfurados	14,53	46.200 (220 × 210)	cimento:cal:areia = 1:1:5	3,64	0,75	10	0,2; 0,6; 1	0,418	0,815
[14] Ahmed; Tanoli (2024)	tijolos de argila (sólidos)	14,4	26.106 (229 × 114)	cimento:areia = 1:5	5,63	–	10	≈ 0,3; 0,6; 0,9	0,52	0,33

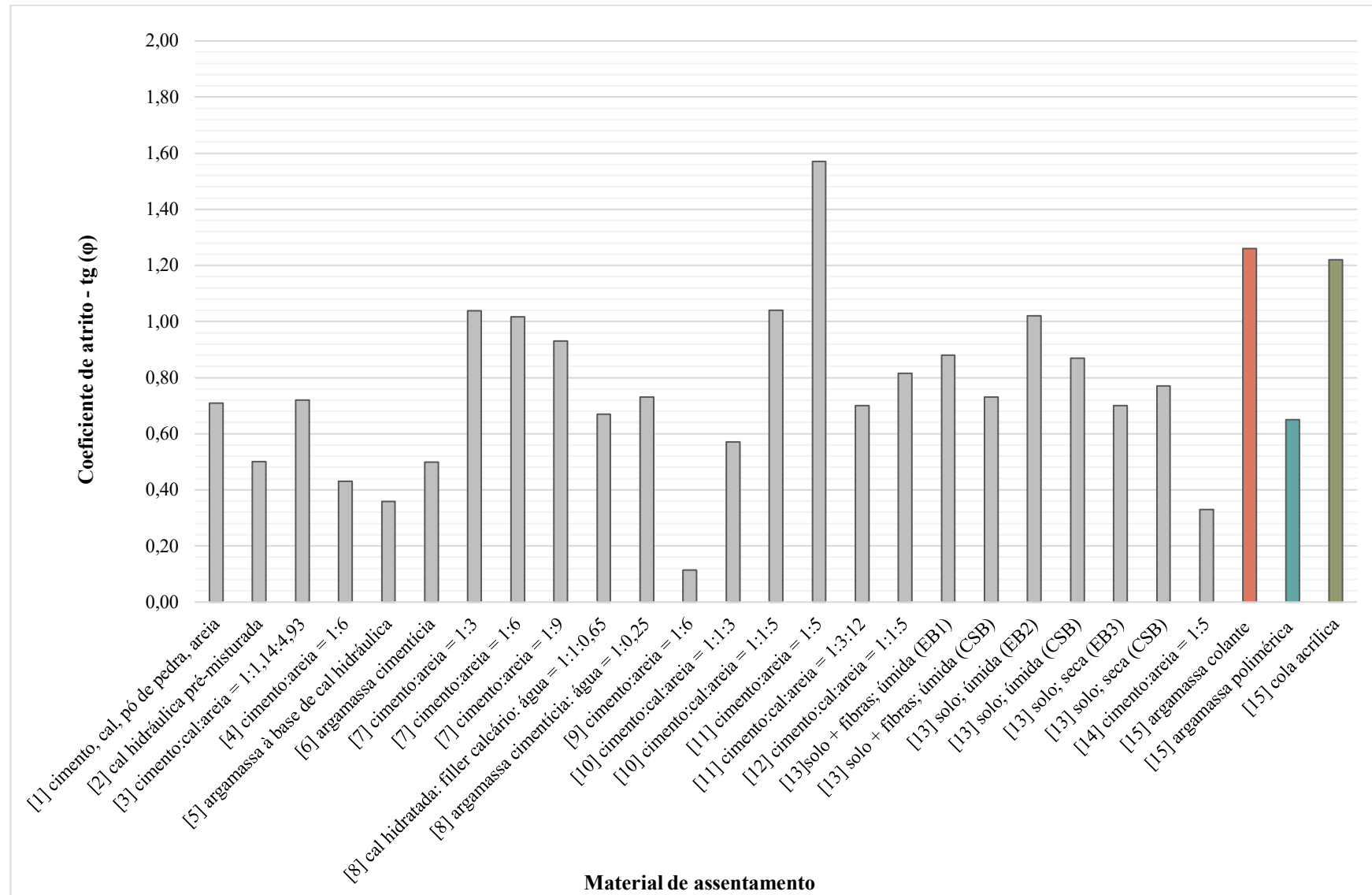
(conclusão)											
Autor(es)	Unidade	$f_t$ (MPa)	$A_c$ (mm <sup>2</sup> )	Argamassa	$R_c$ (MPa)	$R_f$ (MPa)	e (mm)	$\sigma_c$ (MPa)	c (MPa)	tg ( $\varphi$ )	
[13] Becker; Fischer; Waldmann (2024)	blocos de terra com fibras; moldados (EB1)	2,23		argamassa à base de solo, com fibras; úmida (EM1)	3,36	–			0,055 (EM1+EB1)	0,88 (EM1+EB1)	
									0,025 (EM1+CSB)	0,73 (EM1+CSB)	
	blocos de terra sem fibras; moldados (EB2)	2,51		argamassa à base de solo, sem fibras; úmida (EM2)	3,03	–			0,028 (EM2+EB2)	1,02 (EM2+EB2)	
								–	0,05; 0,1; 0,2	0,059 (EM2+CSB)	0,87 (EM2+CSB)
	blocos de terra sem fibras; extrudados (EB3)	7,64		argamassa à base de solo, sem fibras; seca (EM3)	1,56	–			0,033 (EM3+EB3)	0,70 (EM3+EB3)	
									0,063 (EM3+CSB)	0,77 (EM3+CSB)	
	blocos de silicato de cálcio (CSB)	–									
[15] Presente estudo (2025)				argamassa colante	11,88	4,90			0,31	1,07	
	tijolos de solo-cimento (perfurados)	4,79	31.250 (250 × 125)	argamassa polimérica	–	–	2 – 3	0,1; 0,3; 0,5	0,52	0,55	
				cola acrílica	–	–			0,20	0,55	

**Nota:** resistência das unidades à compressão ( $f_t$ ); área de cisalhamento ( $A_c$ ); resistência das argamassas à compressão ( $R_c$ ); resistência das argamassas à flexão ( $R_f$ ); espessura das juntas (e); tensões de pré-compressão aplicadas durante o ensaio *triplet* ( $\sigma_c$ ); coesão (c); coeficiente de atrito (tg ( $\varphi$ )).

**Figura 4.17** – Valores de resistência inicial ao cisalhamento ou coesão ( $c$ ) obtidos em diferentes estudos.



**Figura 4.18** – Valores de coeficiente de atrito ( $\text{tg}(\varphi)$ ) obtidos em diferentes estudos.



#### 4.2.5 Modos de falha

A avaliação visual dos prismas após o ensaio de cisalhamento é fundamental para compreender os mecanismos de falha e correlacioná-los com os resultados quantitativos de rigidez, ductilidade e resistência. Para isso, é essencial considerar que as unidades de alvenaria utilizadas neste estudo consistiram em tijolos de encaixe. Este mecanismo de intertravamento tem uma influência crucial na resistência e nos modos de falha das juntas. O encaixe proporciona um confinamento mecânico adicional que impede o deslizamento puro da interface (Sturm *et al.* ((2015); Safiee *et al.* (2018); Xie *et al.* (2023)).

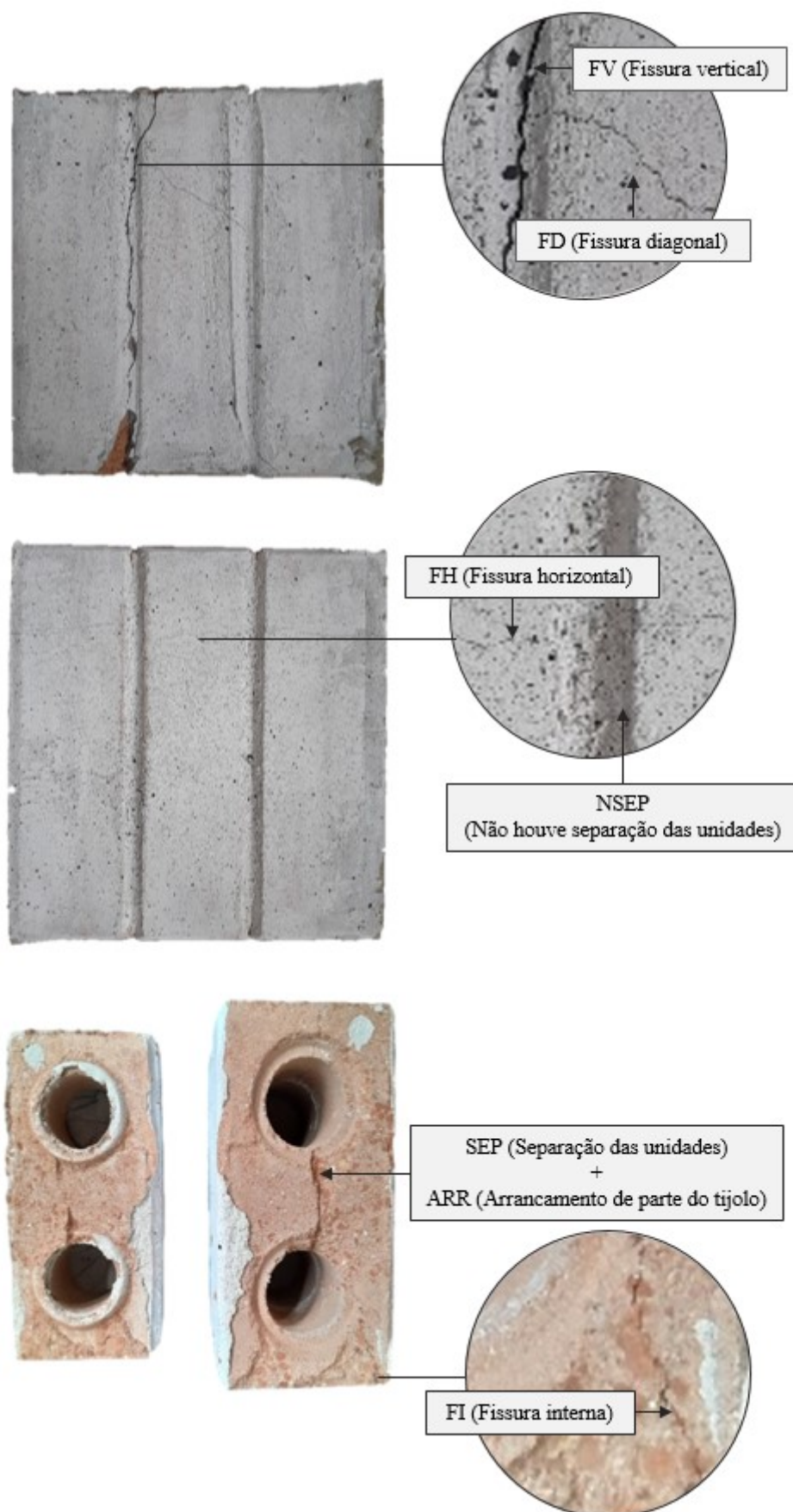
Sob cisalhamento, observou-se que os encaixes possivelmente forçaram a redistribuição das tensões, exigindo que a ruptura ocorresse através da seção transversal dos tijolos para que o deslocamento relativo fosse concluído. Assim, a geometria das unidades e a alta aderência dos materiais de assentamento atuaram em conjunto, para a mobilização de resistências por vezes superiores aos valores previstos para sistemas de juntas convencionais.

Em todas as amostras onde ocorreu separação nas juntas, houve também a manifestação de arrancamento de parte das unidades de alvenaria. Este padrão foi observado nas amostras de argamassa colante, em todos os níveis de pré-compressão, bem como nas amostras de argamassa polimérica nas pré-compressões de 0,1 MPa e 0,3MPa, indicando que a resistência de aderência das juntas, mesmo quando essas falharam por separação, foi superior à resistência de uma seção das unidades. Esse mecanismo, facilitado pelo encaixe dos tijolos foi, possivelmente, um fator importante para a mobilização da resistência ao cisalhamento.

Para a sistematização da análise qualitativa dos modos de falha, a Figura 4.19 estabelece a nomenclatura adotada para as fissuras identificadas após os ensaios de cisalhamento. As siglas referem-se tanto à orientação geométrica do dano (vertical, horizontal ou diagonal) quanto à sua localização (na interface ou no interior da unidade), servindo de legenda para a descrição detalhada dos prismas apresentada nas seções subsequentes.

Nos quadros descritivos, as juntas de assentamento foram identificadas como JE (junta esquerda) e JD (junta direita), conforme a perspectiva frontal do ensaio. De forma análoga, as unidades de solo-cimento foram designadas como UE (unidade esquerda), UD (unidade direita) e UM (unidade do meio), permitindo o mapeamento preciso da trajetória das fissuras e a localização dos modos de falha em cada interface.

**Figura 4.19** – Nomenclatura adotada para as fissuras identificadas nas amostras de alvenaria após os ensaios.



## - Prismas AC

No Quadro 4.1, são listados as fissuras e os danos identificados nos prismas AC, após os ensaios de resistência ao cisalhamento.

**Quadro 4.1** – Modos de falha dos prismas AC, conforme o nível de pré-compressão.

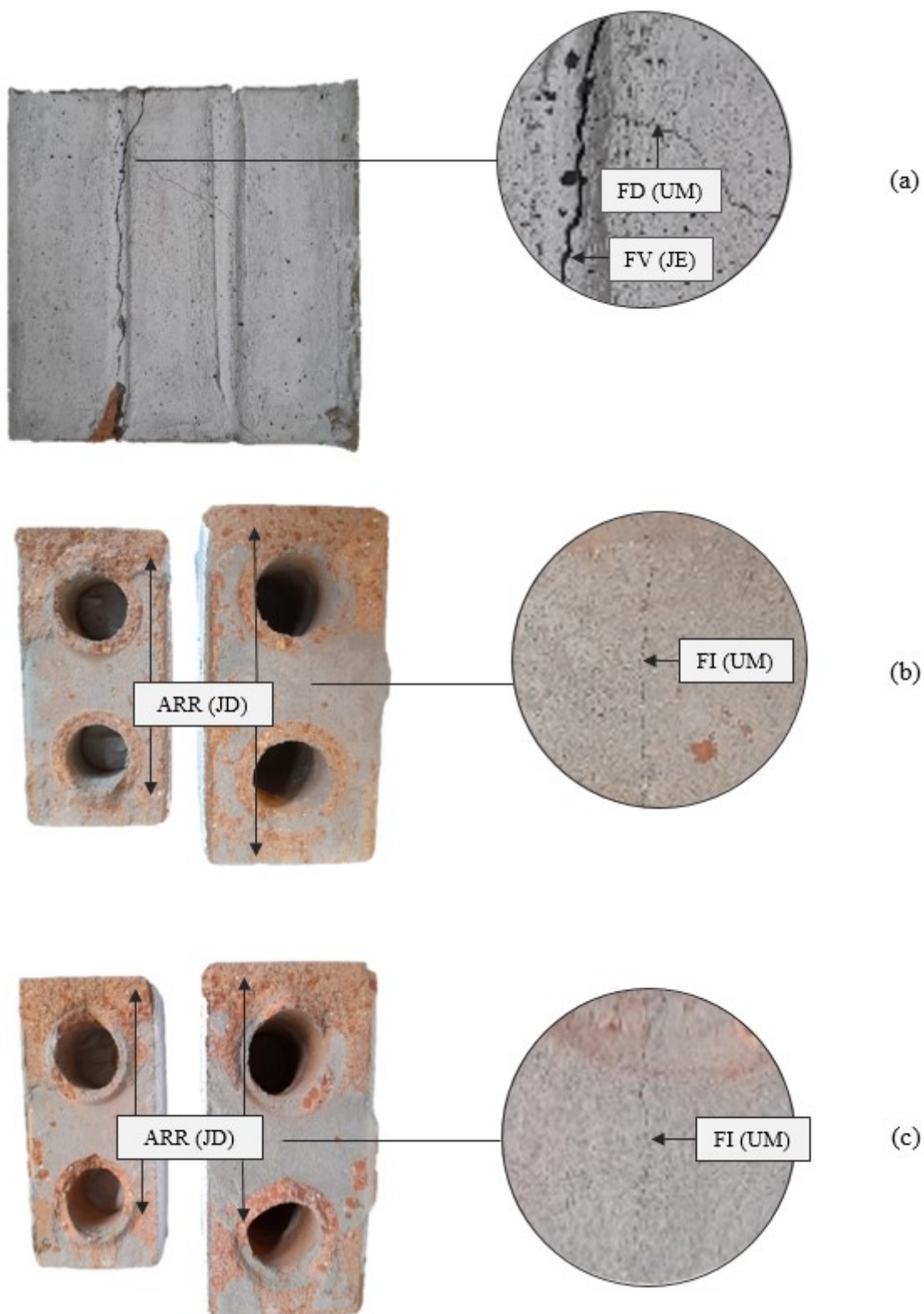
$\sigma_c$ (MPa)	Amostra	Modo de falha
0,1	P <sub>AC1</sub>	FV (JE+JD) – FD (UM) – SEP + ARR (JE)
	P <sub>AC2</sub>	FV (JE) – FH + FI (UM) – SEP + ARR (JE)
	P <sub>AC3</sub>	FV (JE) – FH (UM+UE) – FI + FD (UM) – SEP + ARR (JD)
0,3	P <sub>AC4</sub>	FV (JE+JD) – FI (UM) – SEP + ARR (JD)
	P <sub>AC5</sub>	FV (JD) – NSEP
	P <sub>AC6</sub>	FV (JE+JD) – FI (UM) – SEP + ARR (JD)
0,5	P <sub>AC7</sub>	FV (JE+JD) – SEP + ARR (JD+JE)
	P <sub>AC8</sub>	FV (JD) – FI (UM) – SEP + ARR (JD)
	P <sub>AC9</sub>	FV (JE+JD) – SEP + ARR (JE)

**Nota:** FV: fissura vertical; FD: fissura diagonal; FH: fissura horizontal; FI: fissura interna; ARR: arrancamento de material; JE: junta esquerda; JD: junta direita; UE: unidade esquerda; UM: unidade do meio; UD: unidade direita; SEP: separação das unidades; NSEP: não separação das unidades.

A Figura 4.20 apresenta o detalhamento das fissuras observadas em prismas AC representativos, evidenciando o mapeamento das trajetórias verticais (FV), horizontais (FH) e diagonais (FD) nas unidades. O registro fotográfico completo de todos os espécimes ensaiados, catalogados por nível de pré-compressão, encontra-se disponível no Apêndice C (Figuras C.1 a C.10).

**- Baixa pré-compressão ( $\sigma_c = 0,1$  MPa):** o modo de falha foi caracterizado pela combinação de fissuração nas unidades e separação nas interfaces. As amostras apresentaram fissuras diagonais, horizontais e internas (FD, FH e FI), além de arrancamento de material (ARR) e fissuras verticais nas juntas (FV). Essa complexidade indica que, mesmo sob baixa compressão, a resistência da interface foi suficiente para transferir danos significativos às unidades de solo-cimento.

**Figura 4.20** – Detalhamento dos modos de falha típicos observados nos prismas AC: (a) Fissura vertical na junta esquerda, FV (JE) e fissura diagonal na unidade do meio, FD (UM) no prisma  $P_{AC1}$  ( $\sigma_c = 0,1$  MPa); (b) Fissura interna na unidade do meio, FI (UM), com arrancamento de material na junta direita, ARR (JD) no prisma  $P_{AC4}$  ( $\sigma_c = 0,3$  MPa); (c) Fissura interna, FI (UM) e arrancamento, ARR (JD) no prisma  $P_{AC8}$  sob máxima pré-compressão ( $\sigma_c = 0,5$  MPa).



- **Média pré-compressão ( $\sigma_c = 0,3$  MPa):** neste nível, que resultou em um aumento substancial da resistência ( $\tau_{rup} = 0,8647$  MPa), a aderência tornou-se mais eficaz devido ao incremento do atrito na interface. A amostra  $P_{AC5}$  apresentou um comportamento distinto (NSEP), onde a falha ocorreu por fissuração vertical (FV) sem a separação completa das unidades. Nas demais amostras ( $P_{AC4}$  e  $P_{AC6}$ ), a recorrência de fissuras internas (FI) confirmou a migração de danos para o corpo dos tijolos.

- **Alta pré-compressão ( $\sigma_c = 0,5$  MPa):** sob pré-compressão máxima, predominou a separação das unidades (SEP). A ocorrência de fissuras e arrancamentos sugere que o intertravamento mecânico, potencializado pela geometria de encaixe, elevou a tensão na interface a níveis superiores à resistência à tração do solo-cimento. Contudo, a ausência de ganho de resistência estatisticamente significativa entre  $\sigma_c = 0,3$  e  $\sigma_c = 0,5$  MPa ( $p = 0,973$ ) indica que a capacidade máxima de mobilização de atrito e coesão das juntas AC foi atingida precocemente.

A predominância de rupturas bruscas e o arrancamento de partes da unidade (ARR) estão intrinsicamente ligados à elevada rigidez inicial ( $G$ ) do material cimentício. Por ser menos deformável que materiais com teores poliméricos mais altos, a junta AC não atuou como zona de amortecimento, transferindo as tensões rapidamente para o substrato. Esse fenômeno explica por que a trajetória de fissuração migrou da interface para o corpo dos tijolos: as tensões de tração induzida encontram menor resistência na unidade de solo-cimento do que na interface rigidamente aderida.

#### - Prismas AP

O Quadro 4.2 e a Figura 4.21 fornecem os dados referentes aos ensaios das amostras AP. Os prismas assentados com argamassa polimérica apresentaram um comportamento de falha distinto, com menor variabilidade (CV entre 3,03% e 9,18%), o que é consistente com a sua menor sensibilidade à pré-compressão, demonstrada no gráfico de variação percentual da tensão de ruptura (Figura 4.11 (b)). A repetição deste padrão de dano pode ser conferida nas Figuras C.11 a C.20 do Apêndice C.

**Quadro 4.2** – Modos de falha dos prismas AP, conforme o nível de pré-compressão.

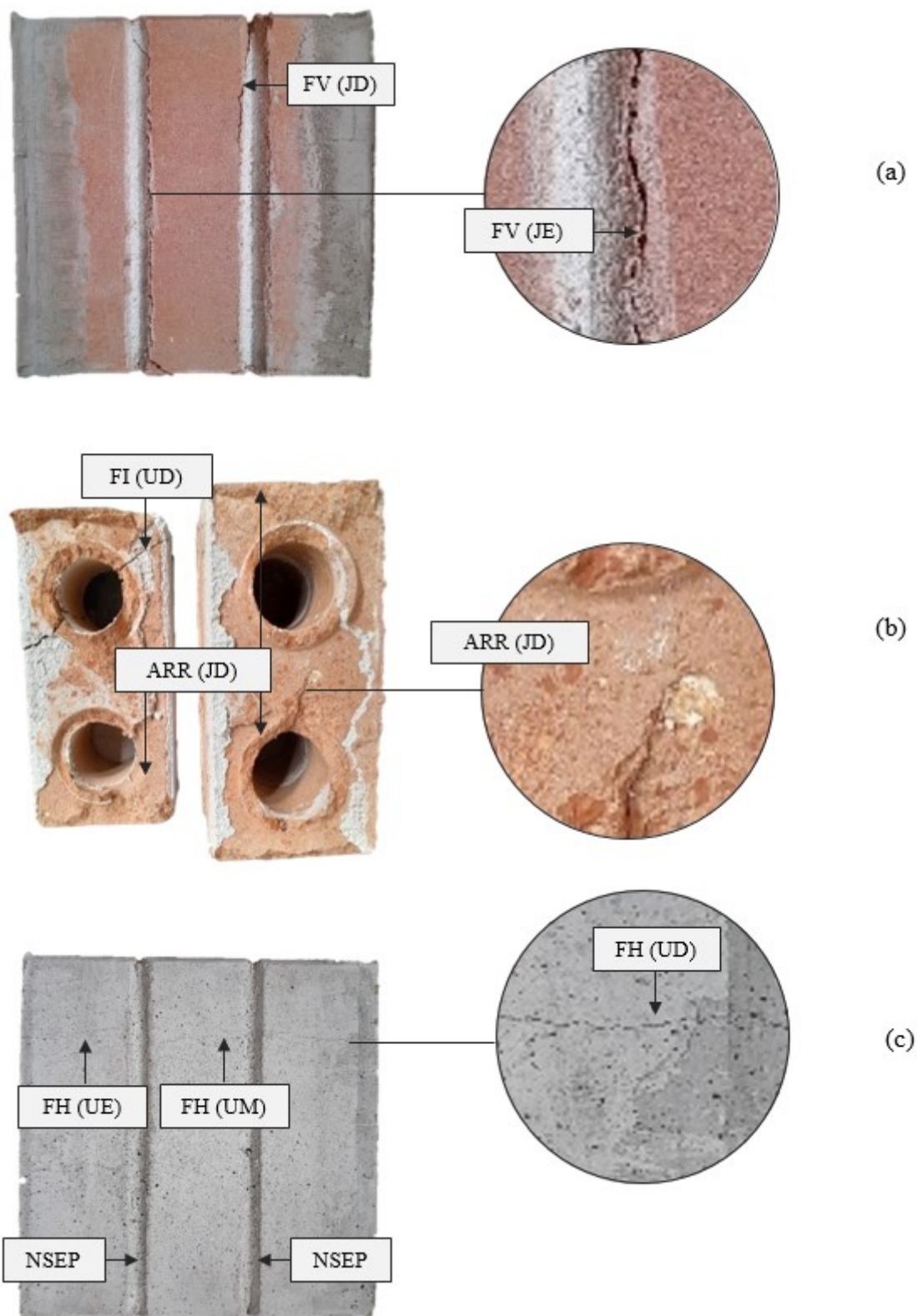
$\sigma_c$ (MPa)	Amostra	Modo de falha
0,1	P <sub>AP1</sub>	FV (JE+JD) – FH (UE) – SEP + ARR (JE+JD)
	P <sub>AP2</sub>	FV (JE+UM+JD+UD) – FI + FD (UM) – SEP + ARR (JD)
	P <sub>AP3</sub>	FV (JE+JD) – SEP + ARR (JE)
0,3	P <sub>AP4</sub>	FV (JE+JD) – FD + FI (UD) – SEP + ARR (JD)
	P <sub>AP5</sub>	FV (JD) – FD (UD) – FI (UM) – SEP + ARR (JD)
	P <sub>AP6</sub>	FV (JE+JD) – FH + FD + FI (UM) – SEP + ARR (JD)
0,5	P <sub>AP7</sub>	FH (UE+UM) – NSEP
	P <sub>AP8</sub>	FH (UE+UM+UD) – NSEP
	P <sub>AP9</sub>	FV (UE) – FH (UM+UD) – NSEP

**Nota:** FV: fissura vertical; FD: fissura diagonal; FH: fissura horizontal; FI: fissura interna; ARR: arrancamento de material; JE: junta esquerda; JD: junta direita; UE: unidade esquerda; UM: unidade do meio; UD: unidade direita; SEP: separação das unidades; NSEP: não separação das unidades.

- **Baixa pré-compressão ( $\sigma_c = 0,1$  MPa):** o modo de falha predominante foi a fissuração vertical das juntas e a separação das unidades na interface (SEP), acompanhada de fissuras horizontais (FH) e internas (FI) nas unidades. A concentração das falhas nas interfaces indica que a coesão inicial das juntas AP foi superada pela tensão de cisalhamento nesta região. Contudo, a presença de fissuras nos tijolos desde o nível mais baixo de carga evidencia que a transmissão de danos para o substrato foi um fenômeno precoce neste sistema.

- **Média pré-compressão ( $\sigma_c = 0,3$  MPa):** o padrão de separação na interface por fissuras verticais (FV) foi mantido. Embora a resistência média tenha aumentado, o ganho não foi estatisticamente significativo em relação a  $\sigma_c = 0,1$  MPa ( $p = 0,702$ ). A manutenção da falha nas juntas confirmou o baixo coeficiente de atrito da AP, indicando que o incremento da pré-compressão não foi suficiente para reforçar a travamento da interface neste estágio.

**Figura 4.21** – Detalhamento dos modos de falha típicos observados nos prismas AP: (a) Fissura vertical nas juntas esquerda e direita, FV (JE+JD) no prisma  $P_{AP3}$  ( $\sigma_c = 0,1$  MPa); (b) Fissura interna na unidade direita, FI (UD), com arrancamento de material na junta direita, ARR (JD) no prisma  $P_{AP4}$  ( $\sigma_c = 0,3$  MPa); (c) Fissura horizontal nas três unidades, FI (UE+UM+UD) sem separação nas juntas no prisma  $P_{AP8}$  sob máxima pré-compressão ( $\sigma_c = 0,5$  MPa).



- **Alta pré-compressão ( $\sigma_c = 0,5$  MPa):** neste nível, observou-se uma transição do modo de falha. As amostras apresentaram fissuração e ruptura nas unidades (FI e FD) sem a separação completa das interfaces (NSEP). Embora o ganho de resistência em relação a  $\sigma_c = 0,3$  MPa tenha ficado no limiar da significância estatística ( $p = 0,052$ ), a mudança no modo de ruptura sugere que a carga normal elevou a resistência ao deslizamento da interface a um patamar superior à resistência à tração diagonal dos tijolos.

A transferência do dano das juntas para as unidades em  $\sigma_c = 0,5$  MPa indica que o aumento da carga normal impediu o escorregamento na interface. Entretanto, a rigidez intermediária da argamassa polimérica não foi suficiente para dissipar a energia de deformação de forma eficiente, levando à fissuração das unidades. Diferente das amostras AC, onde a rigidez foi alta, a AP permitiu uma deformação maior antes da ruptura, mas a fragilidade dos tijolos de solo-cimento foram o fator limitante do sistema sob altas tensões confinantes.

#### – Prismas CA

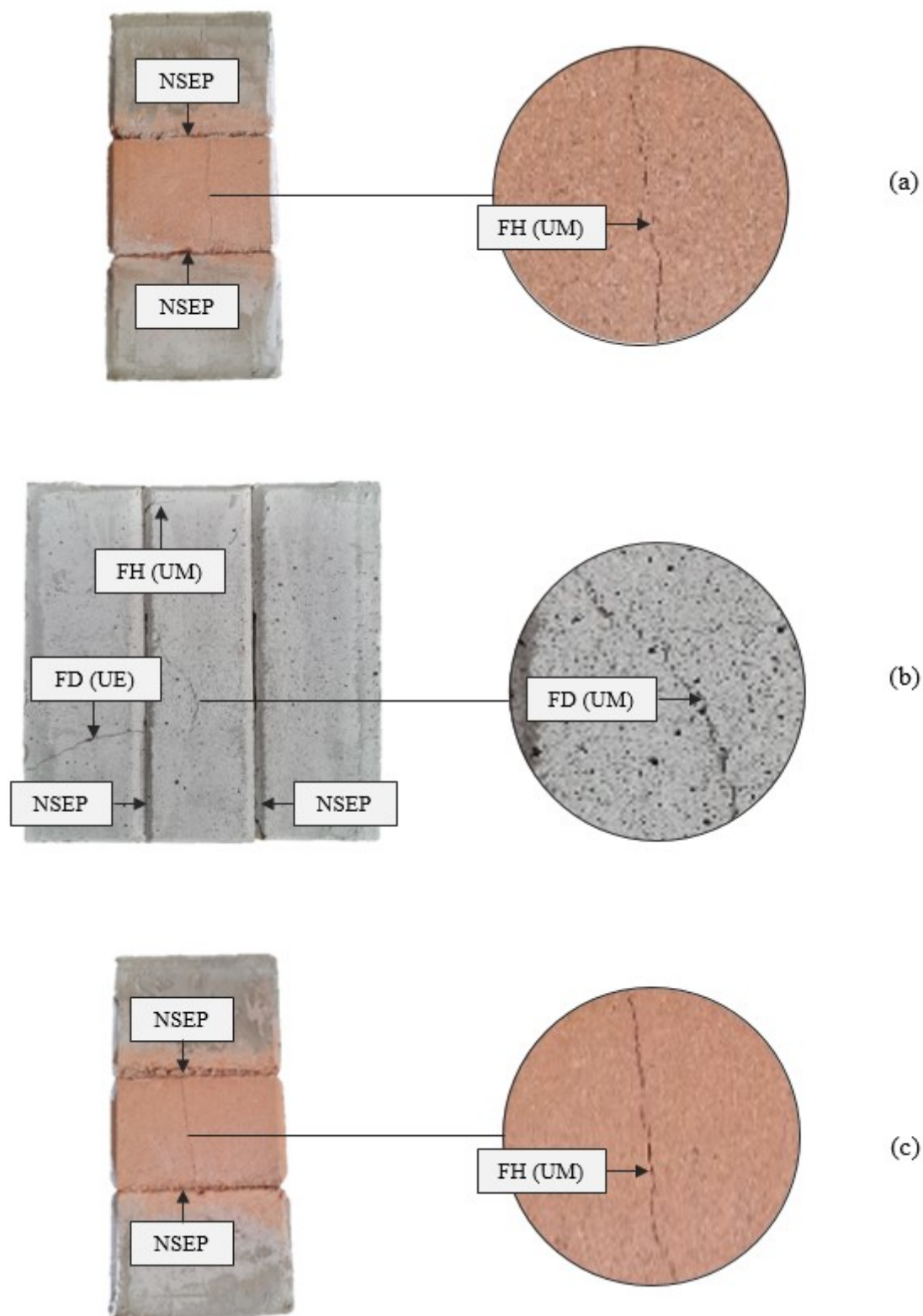
O Quadro 4.3 e a Figura 4.22 apresentam os resultados dos ensaios de cisalhamento dos prismas CA. Demais imagens do padrão de falha dessas amostras podem ser conferidas nas Figuras C.21 a C.30 do Apêndice C.

**Quadro 4.3** – Modos de falha dos prismas CA, conforme o nível de pré-compressão.

$\sigma_c$ (MPa)	Amostra	Modo de falha
0,1	P <sub>CA1</sub>	FD (UE+UM) – FH (UM) – NSEP
	P <sub>CA2</sub>	FH + FD (UM) – NSEP
	P <sub>CA3</sub>	FH (UM) – NSEP
0,3	P <sub>CA4</sub>	FH (UM) – NSEP
	P <sub>CA5</sub>	FH (UM+UD) – NSEP
	P <sub>CA6</sub>	FD (UE+UM+UD) – FH (UM) – NSEP
0,5	P <sub>CA7</sub>	FH (UM) – NSEP
	P <sub>CA8</sub>	FH (UM) – NSEP
	P <sub>CA9</sub>	FD (UE+UM) – FH (UM) – NSEP

**Nota:** FD: fissura diagonal; FH: fissura horizontal; UE: unidade esquerda; UM: unidade do meio; UD: unidade direita; NSEP: não separação das unidades.

**Figura 4.22** – Detalhamento dos modos de falha típicos observados nos prismas CA: (a) Fissura horizontal na unidade do meio, FH (UM), no prisma  $P_{CA2}$  ( $\sigma_c = 0,1$  MPa); (b) Fissura horizontal na unidade do meio, FH (UM) e fissura diagonal nas unidades esquerda e do meio, FD (UE+UM) no prisma  $P_{CA6}$  ( $\sigma_c = 0,3$  MPa); (c) Fissura horizontal na unidade do meio, FH (UM) no prisma  $P_{CA8}$  sob máxima pré-compressão ( $\sigma_c = 0,5$  MPa). Destaque para a não separação das juntas (NSEP) em todas as amostras.



As amostras assentadas com cola acrílica apresentaram o comportamento de falha mais distinto em relação ao efeito da pré-compressão. O aumento da variabilidade nos resultados (CV de 1,82% em  $\sigma_c = 0,1$  MPa para 14,15% em  $\sigma_c = 0,5$  MPa) reflete a sua alta sensibilidade ao nível de compressão, conforme indicado na ANOVA de interação.

- **Baixa pré-compressão ( $\sigma_c = 0,1$  MPa):** o modo de falha foi caracterizado pela presença de fissuras diagonais (FD) e horizontais (FH) nas unidades, predominantemente sem a separação das juntas (NSEP). Embora a resistência média tenha sido de 0,6084 MPa a integridade da interface, mesmo sob baixa compressão, confirma a eficiência da aderência química inicial do material de assentamento.

- **Média e alta pré-compressão ( $\sigma_c = 0,3$  MPa e  $\sigma_c = 0,5$  MPa):** sob esses níveis, as amostras CA apresentaram um aumento expressivo na resistência, atingindo 1,0968 MPa em  $\sigma_c = 0,5$  MPa — o valor máximo registrado nesta pesquisa. O modo de falha predominante foi o colapso das unidades, evidenciado por intensa fissuração diagonal (FD), horizontal (FH) e interna (FI). A manutenção do modo NSEP em todas as amostras foi o dado mais relevante, demonstrando que a resistência ao cisalhamento das juntas CA superou a resistência mecânica dos tijolos de solo-cimento.

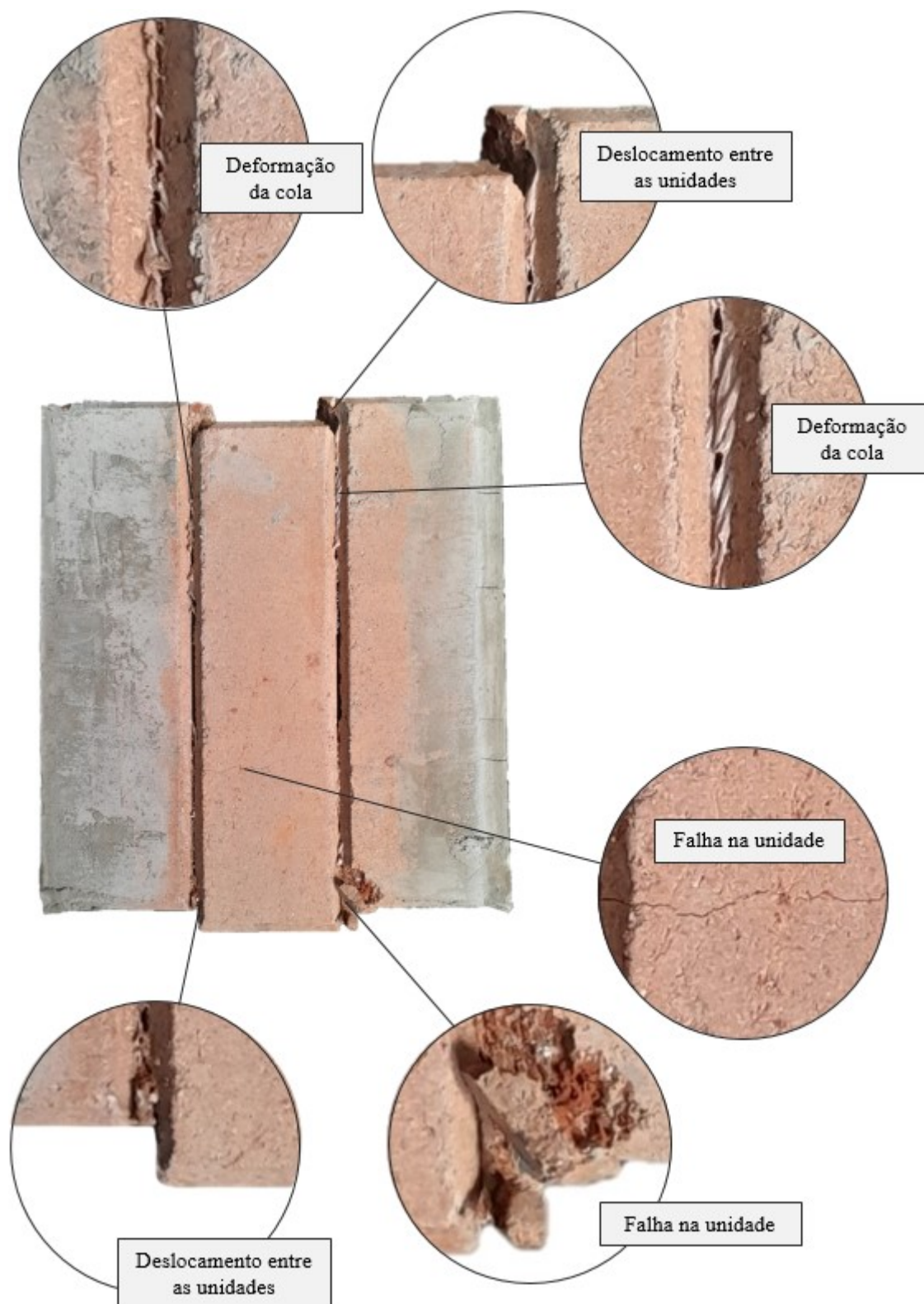
O comportamento macroestrutural das juntas CA evidenciou sua natureza polimérica. A matriz acrílica amorfa conferiu à junta baixa rigidez e alta ductilidade, permitindo uma redistribuição de tensões que transferiu a falha para os tijolos em todos os níveis de pré-compressão. Isso confirma que a aderência polimérica superou a resistência à tração das unidades de solo-cimento.

A análise de sensibilidade corroborou esses padrões: o elevado coeficiente de atrito (1,22) justifica a severidade das fissuras nas unidades sob maior pré-compressão, uma vez que o atrito impede o deslizamento na interface. Em contraste, a estabilidade das juntas AP (menor erro padrão, com SE = 0,04 para coesão) reflete um modo de falha governado pela composição química, enquanto nas juntas CA a compressão externa potencializa o travamento mecânico.

A Figura 4.23 demonstra a deformação acentuada da cola acrílica e o expressivo deslocamento relativo entre as unidades após os ensaios. Essa capacidade de absorver energia e deformar-se sem colapso imediato da junta sugere um comportamento dúctil, desejável em estruturas sujeitas a ações dinâmicas. Diferente das juntas AC e AP, as juntas CA não apenas atingiram

os maiores níveis de resistência, como mantiveram a transferência de danos para as unidades de forma consistente ao longo dos ensaios.

**Figura 4.23** – Prismas CA: deslocamento entre unidades; alta deformação da cola e falha da unidade.



A fissuração das unidades de alvenaria, observada em todos os grupos experimentais, confirma que a resistência ao cisalhamento das interfaces superou a resistência intrínseca dos tijolos. O mecanismo de fissuração no corpo das unidades evidencia a ocorrência de tração induzida, desencadeada pelo estado de tensões principais diagonais gerado pela combinação da pré-compressão horizontal ( $\sigma_c$ ) e do cisalhamento vertical ( $\tau$ ) (Plevris; Asteris, 2014).

A geometria dos tijolos de solo-cimento atuou como fator determinante nesse processo, uma vez que o eixo longitudinal dos furos, posicionado paralelamente à tensão normal, criou regiões de concentração de tensões. Conforme aponta a literatura (Almeida *et al.*, 2024), a presença de vazios direciona a ruptura para as seções de menor área líquida, justificando o padrão de fissuração horizontal e interna (FH e FI) observado nas laterais das unidades.

Em suma, a elevada aderência química da argamassa polimérica (AP) e da cola acrílica (CA) foi o fator decisivo para o deslocamento do plano de falha da interface para o interior das unidades. Enquanto a maior rigidez da argamassa colante (AC) favoreceu rupturas bruscas e instáveis, a ductilidade da cola acrílica preservou a integridade da junta mesmo sob grandes deformações, permitindo atingir a resistência máxima de 1,0968 MPa sob danos severos aos tijolos.

## 5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa estabeleceu os parâmetros fundamentais para o comportamento ao cisalhamento de alvenarias de solo-cimento com juntas finas, preenchendo uma lacuna na literatura sobre a interação entre materiais poliméricos de assentamento e tijolos de solo-cimento. Os resultados demonstraram que o uso de juntas finas de argamassa colante (AC), argamassa polimérica (AP) e cola acrílica (CA) eleva a resistência da interface a um patamar que, em níveis elevados de confinamento, supera a resistência das próprias unidades de solo-cimento.

O principal avanço deste estudo é a comprovação de que a aderência conferida pelos três sistemas é capaz de superar a resistência à tração diagonal do substrato. Enquanto a literatura tradicional foca no escorregamento da junta, este trabalho demonstrou que o comportamento das juntas sob cisalhamento é governado pela eficiência da interface: seja pela elevada coesão inicial (AP) ou pelo travamento mecânico por atrito (AC e CA), ambos capazes de transferir danos para as unidades antes do escorregamento.

Um ponto fundamental desta pesquisa diz respeito à análise da variabilidade dos resultados. Embora parâmetros como o módulo de cisalhamento ( $G$ ) e a deformação de ruptura por cisalhamento ( $\gamma_{rup}$ ) tenham apresentado coeficientes de variação elevados (superando 50% em alguns grupos), a aplicação rigorosa da Análise de Variância (ANOVA) e do teste de Tukey garantiu a confiabilidade estatística das conclusões. A análise demonstrou que tal dispersão não decorreu de imprecisões experimentais, mas da natureza intrínseca dos materiais (como a ductilidade polimérica da cola acrílica ou a fragilidade cimentícia da argamassa colante) e da heterogeneidade do substrato de solo-cimento. Assim, as tendências observadas são estatisticamente significativas ( $p < 0,05$ ), validando as interpretações propostas.

A análise indicou que as propriedades de rigidez e ductilidade são inerentes à natureza química dos materiais. O módulo  $G$  caracterizou as juntas AC como o sistema de maior rigidez, enquanto as juntas CA destacaram-se pela ductilidade superior, apresentando um longo patamar de deslocamento antes da ruptura, contrastando com o comportamento frágil das juntas AC e AP.

No que tange à resistência ( $\tau_{rup}$ ), a tensão de ruptura por cisalhamento foi o único parâmetro influenciado de forma significativa pela interação entre material de assentamento e pré-compressão ( $\sigma_c$ ). Observou-se que a junta AP é governada primariamente pela coesão, não apresentando ganhos significativos de resistência com o aumento do confinamento. Contudo, a partir de  $\sigma_c = 0,3$  MPa, as resistências médias dos três sistemas tenderam à equivalência estatística, demonstrando que o confinamento equalizou a capacidade de carga final ao limite de resistência das unidades.

Para fins de cálculo estrutural, os resultados indicaram que o sistema de juntas finas superou consistentemente os valores de coesão e atrito propostos pela NBR 16868-1, permitindo o dimensionamento de paredes com maior segurança contra esforços horizontais. Recomenda-se o uso de AP em pavimentos superiores (onde a compressão é baixa e a coesão é crítica), enquanto a CA é indicada para estruturas sujeitas a vibrações devido à sua capacidade de redistribuição de tensões. Para edifícios onde a rigidez global é prioritária, a AC permanece como a solução mais adequada.

Em suma, este trabalho valida a viabilidade técnica das juntas finas em alvenarias de solo-cimento, demonstrando que esse sistema é capaz de atingir uma resistência ao cisalhamento superior a 1,0 MPa, desde que a resistência à tração das unidades seja compatível com a alta aderência dos materiais de assentamento escolhidos.

### **Sugestões para trabalhos futuros**

Com base nos resultados e nas discussões apresentadas nesta pesquisa, são sugeridos os seguintes tópicos para investigações futuras:

- Avaliar o comportamento mecânico das juntas finas em diferentes teores de umidade ou em estado de saturação. Dado que os tijolos de solo-cimento e os materiais poliméricos podem apresentar sensibilidade à presença de água, é fundamental quantificar a degradação da coesão e do atrito sob condições de intemperismo crítico.
- Investigar o comportamento mecânico das juntas de cola acrílica sob carregamentos cíclicos e de longa duração (fluência), verificando se a sua alta ductilidade se mantém estável ao longo da vida útil da estrutura.

- Realizar uma análise numérica via Elementos Finitos (MEF) para isolar a influência da geometria específica dos furos dos tijolos sobre o mecanismo de tração induzida. Isso permitiria otimizar a geometria das unidades para reduzir a concentração de tensões observada nas falhas horizontais e internas (FH e FI).
- Expandir o ensaio *triplet* para níveis de pré-compressão superiores a 0,5 MPa, visando identificar o ponto em que as resistências das juntas AC e AP se tornam limitadas exclusivamente pela ruptura das unidades, como observado de forma mais clara nas juntas CA.

## 6 REFERÊNCIAS

AATTACHE, A.; SOLTANI, R. Durability-related properties of early-age and long-term resistant laboratory elaborated polymer-based repair mortars. **Construction and Building Materials**, v. 235, 28 fev. 2020.

ABBEY, K. J.; ZALUCHA, D. J. The chemistry of structural adhesives: Epoxy, urethane, and acrylic adhesives. *In*: Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology, 12 ed. Springer US, 2012. v. 1–2, p. 549–572.

ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. Newman-Keuls Test and Tukey Test. *In*: SALKIND, N. (ed.). Encyclopedia of Research Design. Thousand Oaks: Sage, 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14081-1**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16590-1**: Composto polimérico para assentamento de alvenaria de vedação - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16590-2**: Composto polimérico para assentamento em alvenaria de vedação - Parte 2: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16868-1**: Alvenaria estrutural - Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16868-2**: Alvenaria estrutural - Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17086-6**: Cimento Portland — Análise química - Parte 6: Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2023.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8492:** Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522-1:** Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021.

ADAMS, R.D. ; COMYN, J.; WAKE, W.C. **Structural Adhesive Joints in Engineering**. Barking: Elsevier Science, 1984.

AHMED, H. A.; TANOLI, W. A. Investigating the confinement effects on masonry behavior based on friction interface. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, 1 dez. 2024.

AHMED, O. *et al.* Advancements in fiber-reinforced polymer composite materials damage detection methods: Towards achieving energy-efficient SHM systems. **Composites Part B: Engineering**, 15 out. 2021.

ALECCI, V. *et al.* Shear strength of brick masonry walls assembled with different types of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1038–1045, 2013.

ALMEIDA, O. M. L. *et al.* Furos em blocos cerâmicos para fins estruturais: estudo de características estáticas e dinâmicas através de experimentos e modelos numéricos. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 61, n. 2, p. 401, 10 abr. 2024.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1660-10:** Standard Specification for Thin-bed Mortar for Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Masonry. West Conshohocken : ASTM International, 2018.

AMIRASLANZADEH, R. *et al.* Experimental study on shear strength of concrete filled masonry brick walls. *In: Earthquake Engineering Research Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, 33., 2013, Tóquio. **Anais [...]**. Tóquio: Japan Society of Civil Engineers, 2013.

ANAGNOSTOPOULOS, C. A.; SAPIDIS, G.; PAPASTERGIADIS, E. Fundamental properties of epoxy resin-modified cement grouts. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 184–195, 30 out. 2016.

ANGIOLILLI, M.; GREGORI, A. Triplet test on rubble stone masonry: Numerical assessment of the shear mechanical parameters. **Buildings**, v. 10, n. 3, 1 mar. 2020.

ARANDA-JIMÉNEZ, Y. *et al.* Compressed earth blocks (CEB) compression tested under two earth standards. **Cogent Engineering**, v. 10, n. 1, 2023.

ARAÚJO; I. N. **Modelagem elastoplástica de colunas de concreto confinadas por polímeros reforçados com fibra**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Civil). Centro de Tecnologia, Ufal. Maceió, 2017.

ARIFFIN, N. F. *et al.* Strength properties and molecular composition of epoxy-modified mortars. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 315–322, 18 jul. 2015.

ASSIS, F. L.C. de. **Influência do tipo de junta de assentamento no comportamento mecânico de alvenarias confeccionadas com tijolos ecológicos**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

BAILLY, G. C. *et al.* Advancing Earth-Based Construction: A Comprehensive Review of Stabilization and Reinforcement Techniques for Adobe and Compressed Earth Blocks. **Eng**, v.5, n.2, 1 jun. 2024.

BARATTUCCI, S. *et al.* An experimental and numerical study on masonry triplets subjected to monotonic and cyclic shear loadings. **Construction and Building Materials**, v. 254, 10 set. 2020.

BASHA, S. H.; KAUSHIK, H. B. Suitability of fly ash brick masonry as infill in reinforced concrete frames. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 49, n. 9, p. 3831–3845, 1 set. 2016.

BECKER, A.; FISCHER, C.; WALDMANN, D. Experimental investigation of the shear strength of unstabilised earth masonry. *In*: Internationale Fachtagung für Lehmabau, 9., 2024, Weimar. **Anais [...]**. Weimar: LEHM, 2024.

BELEZA, S. C. A. **Medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Caparica, 2017.

BEZERRA, W. V.; AZEREDO, G. A. External sulfate attack on compressed stabilized earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 255–264, 10 mar. 2019.

BLACKARD, B. *et al.* Failure issues of brick masonry. *In*: International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 6., 2007. **Anais [...]**. Catania, p. 1587-1594, 2007.

BLAU, P. J. The significance and use of the friction coefficient. **Tribology International**, v. 34, p. 585–591, 2001.

BOMPA, D. V.; ELGHAZOULI, A. Y. Experimental and numerical assessment of the shear behaviour of lime mortar clay brick masonry triplets. **Construction and Building Materials**, v. 262, 30 nov. 2020.

BOSILJKOV, V. Z.; TOTOEV, Y. Z.; NICHOLS, J. M. Shear modulus and stiffness of brickwork masonry: An experimental perspective. **Structural Engineering and Mechanics**, v. 20, n. 1, p. 21–43, 10 maio 2005.

BRIEN, J. V.; MAHBOUB, K. C. Influence of polymer type on adhesion performance of a blended cement mortar. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 43, p. 7–13, 2013.

BRITO, J. DE; KURDA, R. The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials. **Journal of Cleaner Production**, 25 jan. 2021.

BRULIN, J. *et al.* Methodology for brick/mortar interface strength characterization at high temperature. **Construction and Building Materials**, v. 265, 30 dez. 2020.

BSI - BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS EN 1052-3**: Methods of Test for Masonry – Part 1: Determination of initial shear strength. Londres, 2002.

BSI - BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS EN 1996-1-1**: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. Londres, 2005.

BSI - BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS EN 772-16**: Methods of test for masonry units – Part 16: Determination of dimensions. London: BSI, 2011.

BUSCHOW, K. H. J. *et al.* **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**. 2 ed. Oxford: Elsevier Science, 2001.

CSA - CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CAN/CSA-A371:14**: Masonry construction for buildings. Toronto, 2024.

CARONGE, M. A. *et al.* Effect of water curing duration on strength behaviour of portland composite cement (PCC) mortar. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 271, 2017.

CASSESE, P. *et al.* In-plane shear behaviour of adobe masonry wallets strengthened with textile reinforced mortar. **Construction and Building Materials**, v. 306, 1 nov. 2021.

CAVALCANTI, M. V. S. *et al.* Optimization of structural brickwork laying joints in concrete blocks. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 1, p. 115–134, fev. 2018.

CELANO, T. *et al.* Literature review of the in-plane behavior of masonry walls: Theoretical vs. experimental results. **Materials**, v. 14, n. 11, 1 jun. 2021.

CHARAI, M. *et al.* Comparative study of a clay before and after fired brick-making process. **Materials Today: Proceedings**, v.31, p. 103-108, 2020.

CHATTERJEE, P.; GHOSH, A.; BHANJA, S. Compressive stress–strain behaviour of masonry prisms made of low elastic modulus burnt clay bricks. **Journal of Building Engineering**, v. 78, 1 nov. 2023.

CHEN, X.; WU, S.. Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 804–812, jan. 2013.

CHRISTY, C. F.; SHANTHI, R. M.; TENSING, D. Bond Strength of The Brick Masonry. **International Journal of Architecture (IJA)**, v. 4, n. 1, p. 22-28, jan–jun 2018.

CHURILOV, S.; DUMOVA-JOVANOSKA, E. In-plane shear behaviour of unreinforced and jacketed brick masonry walls. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 50, p. 85–105, jul. 2013.

COSTIGAN, A.; PAVÍA, S.; KINNANE, O. An experimental evaluation of prediction models for the mechanical behavior of unreinforced, lime-mortar masonry under compression. **Journal of Building Engineering**, v. 4, p. 283–294, 1 dez. 2015.

CUADROS-ROJAS, E. *et al.* Experimental analysis of the compressive behaviour of perforated brick masonry using digital image correlation. **Construction and Building Materials**, v. 431, 14 jun. 2024.

CURTH, A. *et al.* 3D printing earth: Local, circular material processing, fabrication methods, and Life Cycle Assessment. **Construction and Building Materials**, v. 421, 29 mar. 2024.

DA PORTO, F. *et al.* In-Plane Behavior of Clay Masonry Walls: Experimental Testing and Finite-Element Modeling. **Journal of Structural Engineering**, v. 136, n. 11, 2010.

DALALBASHI, A.; GHIASSI, B.; OLIVEIRA, D. V. A multi-level investigation on the mechanical response of TRM-strengthened masonry. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 54, n. 6, 1 dez. 2021.

DEBOUCHA, S.; HASHIM, R. Correlation between total water absorption and wet compressive strength of compressed stabilised peat bricks. **International Journal of the Physical Sciences**, v. 6, n. 10, p. 2432–2438, 2011.

DEMAJ, A. *et al.* In-plane shear strength of solid clay brick masonry reinforced with near surface mounted steel bars. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, 1 dez. 2022.

DERKACH, V. The Influence of Temperature Impact on the Strength of Adhesion of Polyurethane Glue-foam with Masonry Products. **EDP Sciences**, 26 nov. 2020.

DHANASEKAR, M. Shear in reinforced and unreinforced masonry: Response, design and construction. **Procedia Engineering**, v. 14, p. 2069-2076, 2011.

DHANASEKAR, M.; DA PORTO, F. Review of the Progress in Thin Bed Technology for Masonry Construction. *In: Canadian Masonry Symposium*, 11, 2009. **Anais [...]**. Toronto: Canadian Masonry Design Centre, 2009.

DONG, J. *et al.* Mechanical behavior and impact resistance of rubberized concrete enhanced by basalt fiber-epoxy resin composite. **Construction and Building Materials**, v. 435, 12 jul. 2024.

DVG-PRECON. Ficha técnica massa polimérica para assentamento de tijolos e blocos. **DVG Precon**, s.d. Disponível em: <[https://www.precon.com.br/app/uploads/2023/05/Ficha\\_Tecnica\\_Massa\\_Polimerica\\_DVG\\_Pr econ.pdf](https://www.precon.com.br/app/uploads/2023/05/Ficha_Tecnica_Massa_Polimerica_DVG_Pr econ.pdf)>. Acesso em: 7 mai. 2025.

DZHAMUEV, B. The effect of polyurethane foam glue on the strength and deformability of aerated concrete masonry when using it as a masonry mortar. *E3S Web of Conferences. Anais [...]*. EDP Sciences, 9 ago. 2023.

ECOLOGIT. FICHA DE INFORMAÇÃO E SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO – Tijofix. **EcolojiT**, 2023.

ECOLOJIT. ESPECIFICAÇÃO DE PRODUTO – Tijofix. **EcolojiT**, 2023.

ELAHI, T. E. *et al.* Effectiveness of saw dust ash and cement for fabrication of compressed stabilized earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 259, 30 out. 2020.

ESTEVAN, L. *et al.* Shear strengthening of masonry walls with Textile Reinforced Mortars (TRM) under high temperature exposure. **Journal of Building Engineering**, v. 63, 1 jan. 2023.

CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1996-1-1: Eurocode 6: Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures**. Brussels, 2020.

EVANGELHO, T. B. **Consideração do esmagamento do concreto através do modelo de trincas sobrepostas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, UFRGS. Porto Alegre, 2013.

FAN, J. *et al.* Mechanical properties and microstructure of polyvinyl alcohol (PVA) modified cement mortar. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 11, 1 jun. 2019.

FERNANDES, J. *et al.* Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, 20 dez. 2019.

FERREIRA, G. C. dos S.; MORENO JÚNIOR, A. L. Cola à base de PVA e argamassa de solo-cimento como alternativas para o assentamento de alvenaria de tijolos maciços de solo-cimento. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 2, p. 237–248, 2011.

FERRETTI, F. *et al.* Shear-sliding behavior of masonry: Numerical micro-modeling of triplet tests. *In*: MESCHKE, G. ; PICHLER, B. ; ROTS, J. G. **Computational Modelling of Concrete Structures**. London: Taylor & Francis Group, p. 941-951, 2018.

FLORIDO, P. G. V. P.; LORDSLEEM, A. C.; PÓVOAS, Y. V. Polymer-modified mortar flexibility of the masonry-concrete structure interface. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, 1 jul. 2024.

FRANCIS, A. J., HORMAN, C. B., and JERREMS, L. E. The effect of joint thickness and other factors on the compressive strength of brick-work. *In*: International Brick Masonry Conference, 2., 1971. **Anais [...]**. Stoke-on-Trent: British Ceramic Research Association, p. 31–37, 1971.

FRANCIS, A. J., HORMAN, C. B., and JERREMS, L. E. The effect of joint thickness and other factors on the compressive strength of brick-work. *In*: International Brick Masonry Conference, 2., 1971. **Anais [...]**. Stoke-on-Trent: British Ceramic Research Association, p. 31–37, 1971.

FRIED, A. N. *et al.* Unreinforced solid dense concrete block walls constructed using thin joint technology. **The Structural Engineer**, v. 83, n. 12, 2005.

GAMS, M.; TRILLER, P.; JÄGER, A. In-plane seismic behaviour of unconfined and confined masonry built from vertically perforated blocks and polyurethane glue. **Structures**, v. 58, 1 dez. 2023.

GAMS, M.; TRILLER, P.; JÄGER, A. In-plane seismic behaviour of unconfined and confined masonry built from vertically perforated blocks and polyurethane glue. **Structures**, v. 58, 1 dez. 2023.

GAO, Q. *et al.* Properties of super-thin layer mortar with recycled brick fines for sintered perforated block masonry. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, 1 jul. 2023.

GARBIN, E. *et al.* Provisional design guidelines for the strengthening of masonry structures subject to in-plane loading. *In: North American Masonry Conference*, 10., 2007. **Anais [...]**. Saint Louis: TMS, 2007.

GATTA, C.; ADDESSI, D.; VESTRONI, F. Static and dynamic nonlinear response of masonry walls. **International Journal of Solids and Structures**, v. 155, p. 291–303, 15 dez. 2018.

GONZÁLEZ-LÓPEZ, J. R. *et al.* Compaction effect on the compressive strength and durability of stabilized earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 179–188, 28 fev. 2018.

GRAUBOHM, M.; BRAMESHUBER, W. Investigations on the Gluing of Masonry Units with Polyurethane Adhesive. *International Masonry Conference*, 8, 2010, Dresden. **Anais [...]**. Dresden, 2010.

GROOT, C.; LARBI, J. The influence of water flow (reversal) on bond strength development in young masonry. **Heron**, v. 44, n. 2, 1999.

GROOT, C.J.W.P. Effects of Water on Mortar-Brick Bond. **Heron**, v. 40, n. 1, p. 57-70, 1995.

GUADAGNUOLO, M. *et al.* Modulus of elasticity and compressive strength of tuff masonry: Results of a wide set of flat-jack tests. **Buildings**, v. 10, n. 5, 1 maio 2020.

HENDRY, A. W. **Structural Masonry**. Londres : MACMILLAN PRESS, 1998. 296 p.

HENDRY, A. W.; SINHA, B. P.; DAVIES, S.R. **Design of Masonry Structures**. Londres: E & FN Spon, 2004. p. 279.

HERNOUNE, H. *et al.* Experimental Research and Numerical Analysis of CFRP Retrofitted Masonry Triplets under Shear Loading. **Polymers**, v. 14, n. 18, 1 set. 2022.

HERNOUNE; HERIHIRI. Masonry Shear Triplets Coated with Fiber Reinforced Mortars. **Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology**, v. 44, n.4, 2023.

HIWOT, M. G. *et al.* Comparative Study on Compressive Strength of Locally Produced Fired Clay Bricks and Stabilized Clay Bricks with Cement and Lime. **Global Scientific Journals**, v. 5, n. 12, p. 147- 157, 2017.

HOFF, E. C. **Appraisal of the Sustainability of Compressed Stabilized Earthen Masonry**. Thesis (Master of Science) - Faculty of The Graduate College, University of Nebraska. Lincoln, p. 99, 2016.

HOUBEN, H. ; GUILLAUD, H. ; CRATERRE. **Earth Construction Technology**. Nairobi: United Nations Centre For HUMAN Settlements (Habitat), 1992. p. 200.

- HOWLADER, M. K.; MASIA, M. J.; GRIFFITH, M. C. Digital image correlation for the analysis of in-plane tested unreinforced masonry walls. **Structures**, v. 29, p. 427–445, 1 fev. 2021.
- HWANG, S. H.; KIM, S.; YANG, K. H. In-plane lateral load transfer capacity of unreinforced masonry walls considering presence of openings. **Journal of Building Engineering**, v. 47, 15 abr. 2022.
- INCERTI; RINALDINI; MAZZOTTI. The evaluation of masonry shear strength by means of different experimental techniques: A comparison between full-scale and laboratory tests. *In*: MODENA, C ; DA PORTO, F. ; VALLUZZI, M. R. Brick and Block Masonry – Trends, Innovations and Challenges. London: Taylor & Francis Group, p. 1645-1652, 2016.
- JAFARI, S.; ROTS, J. G.; ESPOSITO, R. Core testing method to assess nonlinear behavior of brick masonry under compression: A comparative experimental study. **Construction and Building Materials**, v. 218, p. 193–205, 10 set. 2019.
- JAVOHIR, M.; ZAVKIDDINJON, K. Composite adhesive mixtures based on cement: properties, applications, and advancements. **Asian Journal of Multidisciplinary Research and Management Studies**, v. 1, n. 13, 2024.
- JORGE, Z.; RONNY, P.; SOTOMAYOR, O. On the digital image correlation technique. **Materials Today: Proceedings**, v. 49, 79–84, 2022.
- KANYETO, O. J.; FRIED, A. Flexural behaviour of thin joint concrete blockwork: Experimental results. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3639–3647, ago. 2011.
- KAUSHIK, H. B. *et al.* Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 9, 1 set. 2007.
- KUMA, M. M. *et al.* Compressed Stabilized Earth Brick (CSEB) As Building Construction Elements. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, v. 17, n.4, p. 42–48, 2020.
- LAGHI, V. *et al.* High performance mortar for ductile seismic-resistant unreinforced masonry systems. **Construction and Building Materials**, v. 245, 10 jun. 2020.
- LAN, G. *et al.* Compressive strength of earth block masonry: Estimation based on neural networks and adaptive network-based fuzzy inference system. **Composite Structures**, v. 235, 1 mar. 2020.
- LAN, G. *et al.* Study of compressive strength test methods for earth block masonry—Capping method and loading mode. **Journal of Building Engineering**, v. 43, 1 nov. 2021.
- LECOMPTE, D. *et al.* Analysis of speckle patterns for deformation measurements by digital image correlation. *In*: **SPIE**, 7 ago. 2006.
- LEITÃO, D. *et al.* Thermal performance assessment of masonry made of ICEB’s stabilised with alkali-activated fly ash. **Energy and Buildings**, v. 139, p. 44–52, 15 mar. 2017.

LEPAKSHI, R.; REDDY, B. V. Shear strength parameters and Mohr-Coulomb failure envelopes for cement stabilised rammed earth. **Construction and Building Materials**, v. 249, p. 118708, jul. 2020.

LI, L. *et al.* The Influence of Rehydration on the Properties of Portland Cement-Based Materials with Low Water/Binder Ratios: A Review of Existing Research. **Materials**, v. 16, n.3, 1 fev. 2023.

LI, P. *et al.* Effect of Epoxy Latexes on the Mechanical Behavior and Porosity Property of Cement Mortar with Different Degrees of Hydration and Polymerization. **Materials**, v. 14, n.3, 2021.

LIANG, B. *et al.* The influence of different types of mortar on the compressive strength of masonry. **Journal of Building Engineering**, v. 65, 15 abr. 2023.

LIMA, A. V. **Avaliação numérica de alvenaria estrutural devido a cargas dinâmicas**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2024.

LIN, K. *et al.* Experimental characteristics of dry stack masonry under compression and shear loading. **Materials**, v. 8, n. 12, p. 8731–8744, 2015.

LIU, S. *et al.* Shear performance of brick masonry retrofitted by high-strength fibrous cement mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 98, 1 dez. 2024.

LIU, Z.; CREWE, A. J. Effect of position and size of openings on the seismic performance of masonry structures. *In: European Conference on Earthquake Engineering*, 16, 2018, Thessaloniki. **Anais [...]**. 2018. Bristol: University of Bristol, 2018.

LOURENÇO, P. B.; BARROS, J. O.; OLIVEIRA, J. T. Shear testing of stack bonded masonry. **Construction and Building Materials**, v. 18, p. 125-132, mar. 2004.

MADHAVI, K. *et al.* Studies on shear strength and stiffness of brick masonry walls. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

MAHDAD, H.; BENIDIR, A.; BRARA, A. Experimental assessment of mechanical behavior of a compressed stabilized earth blocks (CSEB) and walls. **Journal of Materials and Engineering Structures**, v. 8, p. 95-110, 2021.

MAHDAD, M.; BENIDIR, A. Hydro-mechanical properties and durability of earth blocks: Influence of different stabilisers and compaction levels. **International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development**, v. 9, n. 2, p. 44- 60, 2018.

MAHERI, M. R.; MOTIELAHI, F.; NAJAFGHOLIPOUR, M. A. The effects of pre and post construction moisture condition on the in-plane and out-of-plane strengths of brick walls. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 44, n. 2, p. 541–559, mar. 2011.

MAHESH, J. V. *et al.* Bond strength characteristics of masonry using hemp fibre and chicken mesh reinforced mortar. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

- MALKANTHI, S. N.; PERERA, A. A. Particle Packing Application for Improvement in the Properties of Compressed Stabilized Earth Blocks with Reduced Clay and Silt. **Technology & Applied Science Research**, v. 9, n. 4, p. 4538-4542, 2019.
- MANSOUR, M. B. *et al.* Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). **Construction and Building Materials**, v. 104, p. 44–51, 1 fev. 2016.
- MARQUES, A. C. *et al.* Review on adhesives and surface treatments for structural applications: Recent developments on sustainability and implementation for metal and composite substrates. **Materials**, v. 13, n. 24, 2020.
- MARROCCHINO, E. *et al.* Micro-chemical/structural characterisation of thin layer masonry: A correlation with engineering performance. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 582–594, jan. 2009.
- MSJC - MASONRY STANDARDS JOINT COMMITTEE. **ACI 530-08/ASCE 5-08/TMS 402-08** : Building code requirements and specifications for masonry structures. Boulder/Farmington Hills/Reston: Masonry Standards Joint Committee (MSJC), 2008.
- MATTA, F.; CUÉLLAR-AZCÁRATE, M. C.; GARBIN, E. Earthen masonry dwelling structures for extreme wind loads. **Engineering Structures**, v. 83, p. 163–175, 5 jan. 2015.
- MEDVEY, B.; DOBSZAY, G. Durability of Stabilized Earthen Constructions: A Review. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 38, p. 2403-2424, 2020.
- MODENA, C. *et al.* Reinforced and Rectified Clay Blocks Masonry. SÍSMICA - Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, 6, 2004, Minho. **Anais [...]**. Minho: Universidade do Minho, 2004.
- MÖELLER M.; MATYJASZEWSKI, K. **Polymer Science: A Comprehensive Reference**. Amsterdam: Elsevier Science, 2012.
- MOHAMAD, G. *et al.* Stiffness plasticity degradation of masonry mortar under compression: preliminar results. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 2, p. 279–295, abr. 2018.
- MOHAMAD, G. *et al.* Strength, behavior, and failure mode of hollow concrete masonry constructed with mortars of different strengths. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 489–496, 1 mar. 2017.
- MOHAMMED, A. A. *et al.* The Durability of Innovative Blocks Through Cyclic Testing and Actual Climate Exposure. **Progress in Engineering Science**, p. 100050, jan. 2025.
- MOJSILOVIĆ, N.; STEWART, M.G. Probability and structural reliability assessment of mortar joint thickness in load-bearing masonry walls. **Structural Safety**, v. 52, p. 209–218, 1 jan. 2015.
- MORALES, E. D. **Análise de critérios de falha em materiais dúcteis: um estudo numérico e experimental**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

- MOREIRA, G. A. M. **Estudo da resistência de aderência ao cisalhamento da argamassa colante nos revestimentos de fachada: uma contribuição ao desenvolvimento da metodologia de ensaio**. 2022. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.
- MÜLLER, P. *et al.* Development of partial safety factors for earth block masonry. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 50, n. 1, 1 fev. 2017.
- MURTHY, T. ; PANDURANGAN, K. Behaviour of compressed stabilised earth block masonry under compressive loading. **International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)**, v. 6, n. 1, 2019.
- NALON, G. H. *et al.* Review of recent progress on the compressive behavior of masonry prisms. **Construction and Building Materials**, v. 320, 21 fev. 2022.
- NALON, G. H. *et al.* Strength and failure mechanisms of masonry prisms under compression, flexure and shear: Components mechanical properties as design constraints. **Journal of Building Engineering**, v. 28, 1 mar. 2020.
- NANDA, A. *et al.* Multiple comparison test by Tukey's honestly significant difference (HSD): Do the confident level control type I error. **International Journal of Statistics and Applied Mathematics**, v. 6, n. 1, p. 59–65, 1 jan. 2021.
- NAZIR, S.; DHANASEKAR, M. A non-linear interface element model for thin layer high adhesive mortared masonry. **Computers and Structures**, v. 144, p. 23–39, 2014.
- NAZIR, S.; DHANASEKAR, M. Modelling the failure of thin layered mortar joints in masonry. **Engineering Structures**, v. 49, p. 615–627, abr. 2013.
- NICHOLS, J. **A Study of the Progressive Degradation of Masonry Shear Walls Subjected to Harmonic Loading**. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Newcastle, Newcastle, 2000.
- NICOLINI, A. *et al.* Evaluation of Latex Polymeric mortar properties for laying bricks in non-structural masonry. **Journal of Building Engineering**, v. 59, p. 105080, 2022.
- NINA, J. F.; EIRES, R.; OLIVEIRA, D. V. Earthen Construction: Acceptance among Professionals and Experimental Durability Performance. **Construction Materials**, v. 3, n. 2, p. 143–163, 1 jun. 2023.
- NOGAMI, L. *et al.* Adhesive mortars for stone plate bonding. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 74, n. 4, p. 1489–1497, 1 nov. 2015.
- OREB, J. *et al.* Experimental assessment of strength, stiffness, and drift capacity in masonry walls made from reclaimed concrete demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 497, p. 142964, out. 2025.
- PAN, B. Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement. **Applied Optics**, v. 48, n. 8, 10 mar. 2009.

- PANAGIOTOU, R. *et al.* Durability performance of non-stabilized Compressed Earth Blocks with optimized granular composition. *In: International Conference on Moisture in Buildings*, 1., 2021. **Anais [...]**. Londres : UCL, 2021.
- PANG, B. *et al.* Cement-based ductile rapid repair material modified with self-emulsifying waterborne epoxy. **Journal of Building Engineering**, v. 79, 15 nov. 2023.
- PAULINO, R. S. ; TORALLES, B. M. Influence of the relationships between compressive strengths of mixed and industrialized mortars and concrete blocks on the behavior of masonry prisms. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 17, n.5, 2024.
- PAVAN, G. S.; RAO, K. S. N. Behavior of Brick-Mortar Interfaces in FRP-Strengthened Masonry Assemblages under Normal Loading and Shear Loading. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 2, 2015.
- PLEVRIS, V.; ASTERIS, P. G. Modeling of masonry failure surface under biaxial compressive stress using Neural Networks. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 447–461, 31 mar. 2014.
- PREETHI, R. K.; VENKATARAMA REDDY, B. V. Experimental investigations on geopolymer stabilised compressed earth products. **Construction and Building Materials**, v. 257, 10 out. 2020.
- PROENÇA, J. M.; GAGO, A. S.; VILAS BOAS, A. Structural window frame for in-plane seismic strengthening of masonry wall buildings. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 13, n. 1, p. 98–113, 2 jan. 2019.
- QUEDOU, P. G.; WIRQUIN, E.; BOKHOREE, C. Sustainable concrete: Potency of sugarcane bagasse ash as a cementitious material in the construction industry. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, 1 jun. 2021.
- RAYMUNDO, C.; PARSEKIAN, G.; RAYMUNDO, H. Utilização da Argamassa Polimérica com Junta Fina em Alvenarias de Vedação. *In: Workshop De Tecnologia De Processos e Sistemas Construtivos*, 2017. **Anais [...]**. Galoa, 15 ago. 2017.
- REDDY, B. V. V. **Compressed earth block & rammed earth structures**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022.
- REDDY, B. V. V.; RICHARDSON L.; RAO, K. S. N. Influence of Joint Thickness and Mortar-Block Elastic Properties on the Strength and Stresses Developed in Soil-Cement Block Masonry. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, n. 10, p. 535-542, 2009.
- REMPEL, A. W.; REMPEL, A. R. Frost resilience of stabilized earth building materials. **Geosciences (Switzerland)**, v. 9, n. 8, 1 ago. 2019.
- RILEM TC 127-MS. **MS-D.6**: In situ measurement of masonry bed joint shear strength. *Materials and Structures*, v. 29, p. 470-475, 1996.

RIZA, F. V.; RAHMAN, I. A.; ZAIDI, A. M. A. A brief review of Compressed Stabilized Earth Brick (CSEB). **International Conference on Science and Social Research**, p. 1011-1016, 2010.

ROMERO, A. B. C; FRANCISCA, F. M.; GIOMI, I. Hygrothermal properties of soil–cement construction materials. **Construction and Building Materials**, v. 313, 27 dez. 2021.

RUIZ, G. *et al.* A comprehensive study of mechanical properties of compressed earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 566–572, 10 jul. 2018.

SAFIEE, N. A. *et al.* Behaviour of interlocking mortarless hollow block walls under in-plane loading. *Australian Journal of Structural Engineering*, v. 19, n. 2, p. 87–95, 3 abr. 2018.

SAHLIN, S. **Structural Masonry**. Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1971.

SAIDI, M. *et al.* Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 566–577, 10 abr. 2018.

SAINT-GOBAIN DO BRASIL. Boletim técnico cimento-cola flexível ACIII cinza quartzolit. **Saint-Gobain do Brasil**, 2024. Disponível em: < [https://www.quartzolit.weber/files/br/2024-02/10.\\_BoletimTcnico\\_Cimento-colaFlexivelACIIICinza\\_2024.pdf](https://www.quartzolit.weber/files/br/2024-02/10._BoletimTcnico_Cimento-colaFlexivelACIIICinza_2024.pdf)>. Acesso em: 7 mai. 2025.

SAJANTHAN, K.; BALAGASAN, B.; SATHIPARAN, N. Prediction of compressive strength of stabilized earth block masonry. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, 2019.

SALIBA, J. *et al.* Mechanical characterization and durability of earth blocks. **Materials Today: Proceedings**, jul. 2023.

SAMIULLAH *et al.* MECHANICAL PROPERTIES CHARACTERIZATION OF RAT-TRAP BOND BRICK MASONRY. **Journal of Applied Engineering Science**, v. 20, n. 2, p. 365–371, 2022.

SARANGAPANI, G.; VENKATARAMA REDDY, ; B V; JAGADISH, K. S. Brick-Mortar Bond and Masonry Compressive Strength. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 17, n. 2, 1 abr. 2005.

SARHOSIS, V.; GARRITY, S. W.; SHENG, Y. Influence of brick-mortar interface on the mechanical behaviour of low bond strength masonry brickwork lintels. **Engineering Structures**, v. 88, p. 1–11, 1 abr. 2015.

SAVIANO, F.; LIGNOLA, G. P.; PARISI, F. Experimental compressive and shear behaviour of clay brick masonry with degraded joints. **Construction and Building Materials**, v. 452, 22 nov. 2024.

SAWYER, S. F. Analysis of Variance: The Fundamental Concepts. **Journal of Manual & Manipulative Therapy**, v. 17, n. 2, p. 27E-38E, abr. 2009.

SCADELAI, M. A. **Dimensionamento de pilares de acordo com a NBR 6118:2003**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, 2004.

SEGURA, J. *et al.* Experimental comparison of two testing setups for characterizing the shear mechanical properties of masonry. **Journal of Building Engineering**, v. 44, 1 dez. 2021.

SEKHAR, D. C.; NAYAK, S. Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 531–536, 30 mar. 2018.

SHADLOU, M.; AHMADI, E.; KASHANI, M. M. Micromechanical modelling of mortar joints and brick-mortar interfaces in masonry structures: A review of recent developments. **Structures**, v. 23, p. 831-844, 2020.

SHARMA, V.; MARWAHA, B. M.; VINAYAK, H. K. Enhancing durability of adobe by natural reinforcement for propagating sustainable mud housing. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 5, n. 1, p. 141–155, 2016.

SCHMIDER, E. *et al.* Is it Really Robust? Reinvestigating the Robustness of ANOVA Against Violations of the Normal Distribution Assumption. **Methodology**, v. 6, n. 4, p.147–151, 2010.

SINGH, S. B.; MUNJAL, P. Bond strength and compressive stress-strain characteristics of brick masonry. **Journal of Building Engineering**, v. 9, p. 10–16, 1 jan. 2017.

SIPP, G. **Estudo do Comportamento de Alvenaria Estrutural com Juntas Finas de Composto Polimérico**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.

SIPP, G.; BRESSIANI, L.; MARGARIDO, A. P.; PARSEKIAN, G. A. Considerações sobre alvenaria estrutural com junta fina de argamassa polimérica. *In: Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído*, 20., 2024. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2024.

SIPP, G.; PARSEKIAN, G. A.; BRESSIANI, L.; MARGARIDO, A. P. Alvenaria de Junta Fina com Utilização de Argamassa Polimérica – Principais Características. *In: Workshop De Tecnologia De Processos E Sistemas Construtivos*, 3., 2021. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2021. p. 1–6.

SITTON, J. D. *et al.* Effect of mix design on compressed earth block strength. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 124–131, 15 jan. 2018.

SA - STANDARDS AUSTRALIA. **AS 3700: Masonry Structures**. Sydney: Standards Australia, 2018.

STURM, T.; RAMOS, L. F.; LOURENÇO, P. B. Characterization of dry-stack interlocking compressed earth blocks. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 48, n. 9, p. 3059–3074, 30 set. 2015.

SUSILORINI, R. M. *et al.* The advantage of natural polymer modified mortar with seaweed: Green construction material innovation for sustainable concrete. **Procedia Engineering**, v. 95, p. 419-425, 2014.

SIA - SWISS SOCIETY OF ENGINEERS AND ARCHITECTS. **SIA 266:2015 – Construction en maçonnerie**. SIA : Zurich, 2015.

- TEIXEIRA, E. R. *et al.* Mechanical and thermal performance characterisation of compressed earth blocks. **Energies**, v. 13, n. 11, 1 jun. 2020.
- TEIXEIRA, J.; RIBEIRO, M. Method to measure wafer stiffness in Fan-Out Wafer Level Package. *In: International Symposium on Microelectronics*, 45., 2012. **Anais [...]**. San Diego: IMAPSource Proceedings, p. 720-728, set. 2012.
- TENNANT, A. G.; FOSTER, C. D.; REDDY, B. V. V. Detailed Experimental Review of Flexural Behavior of Cement Stabilized Soil Block Masonry. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 6, jun. 2016.
- THAICKAVIL, N. N.; THOMAS, J. Behaviour and strength assessment of masonry prisms. **Case Studies in Construction Materials**, v. 8, p. 23–38, 1 jun. 2018.
- THAMBOO, J. ; DHANASEKAR, M. ; YAN, C. Thin bed masonry system: review and future prospects. *In: International Conference on Structural Engineering, Construction and Management*, 2011. **Anais [...]**. Sri Lanka: University of Peradeniya, p. 1-10,2011.
- THAMBOO, J. A.; DHANASEKAR, M. Characterisation of thin layer polymer cement mortared concrete masonry bond. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 71–80, 1 maio 2015.
- THAMBOO, J. *et al.* Experimental and analytical study of masonry subjected to uniaxial cyclic compression. **Materials**, v. 13, n. 20, p. 1–17, 2 out. 2020.
- TMS - THE MASONRY SOCIETY. **TMS 402/602-22: Building code requirements and specification for masonry structures**. Longmont, 2022.
- TRIPURA, D. D.; KASINIKOTA, P. Axial load behavior of unreinforced and reinforced hollow interlocking compressed stabilized earth block masonry walls. **Construction and Building Materials**, v. 407, 1 dez. 2023.
- TRUONG, G.T.; TRAN, H. V.; CHOI, K. K. Tensile Behavior of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites Incorporating Nanomaterials after Exposure to Elevated Temperature. *Journal of Nanomaterials*, v. 2019, 2019.
- UNEP - UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **Global Status Report for Buildings and Construction. Beyond foundations: Main-streaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector**. 2024. Disponível em: [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/45095/global\\_status\\_report\\_buildings\\_construction\\_2023.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/45095/global_status_report_buildings_construction_2023.pdf?sequence=3&isAllowed=y). Acesso em: 7 mai. 2024.
- USMAN, M.; PANWAR, R. The Influence Of Mortar Thickness And Strength On The Mechanical Characteristics Of Masonry Brickwork. **International Journal Of Progressive Research In Engineering Management And Science (IJPREAMS)**, v. 04, n. 05, p. 1775-1783, mai. 2024.
- VAN DAMME, H.; HOUBEN, H. Earth concrete. Stabilization revisited. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 90-102, 2018.

- VYNCKE, J.; KUPERS, L.; DENIES, N. Earth as Building Material – an overview of RILEM activities and recent Innovations in Geotechnics. **MATEC Web of Conferences**, v. 149, p. 02001, 2018.
- WALLIMAN, N.; BAICHE, B.; OGDEN, R. Thin-joint glued brickwork: Building in the British context. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 6, p. 1081–1092, jun. 2008.
- WANG, J.; HEATH, A.; WALKER, P. Experimental investigation of brickwork behaviour under shear, compression and flexure. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 448–456, 2013.
- WAZIRI, B. S.; LAWAN, Z. A.; MUSTAPHA, M. M. Properties of Compressed Stabilized Earth Blocks (CSEB) For Low-Cost Housing Construction: A Preliminary Investigation. **International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology**, v. 4, n.2, 2013.
- WIEHLE, P. *et al.* Influence of relative humidity on the strength and stiffness of unstabilised earth blocks and earth masonry mortar. **Construction and Building Materials**, v. 342, 1 ago. 2022.
- WIEHLE, P.; BRINKMANN, M. Material behaviour of unstabilised earth block masonry and its components under compression at varying relative humidity. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, 1 dez. 2022.
- XIE, G. *et al.* Behaviour of reinforced mortarless interlocking brick wall under cyclic loading. **Engineering Structures**, v. 283, 15 mai. 2023.
- YADAV, A.; PAL, S. The impact of mortar thickness and strength on the brick masonry prism: An investigation. **Materials Today: Proceedings**, v. 93, p. 552-559, 2023.
- YAO, X. *et al.* Innovative seismic strengthening of historic masonry walls using polymer mortar and steel strips. **Engineering Structures**, v. 228, 1 fev. 2021.
- YARDIM, Y.; LALAJ, O. Shear strengthening of unreinforced masonry wall with different fiber reinforced mortar jacketing. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 149–154, 15 jan. 2016.
- YAZZIE, K. E. *et al.* Digital Image Correlation Analysis of the Deformation Behavior of Pb Free Solders at Intermediate Strain Rates. **JOM**, v. 62, n. 7, jul. 2010.
- YOGANANTH, Y. *et al.* Comparison of strength and durability properties between earth-cement blocks and cement–sand blocks. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 4, n. 1, 1 dez. 2019.
- ZAHRA, T.; DHANASEKAR, M. Prediction of masonry compressive behaviour using a damage mechanics inspired modelling method. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 128–138, 2016.
- ZAPPILE, J.; RESENDE, M. A influência de polímeros na aderência e flexibilidade da argamassa colante. *In: Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído*, 18., 2020. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020.

ZENGIN, B. *et al.* The effect of mortar type and joint thickness on mechanical properties of conventional masonry walls. **Structural Engineering and Mechanics**, v. 67, n. 6, p. 579-585, 25 set. 2018.

ZHANG, X. *et al.* Polymer-modified cement mortars: Their enhanced properties, applications, prospects, and challenges. **Construction and Building Materials**, v. 229, 2021.

ZIMMERMANN, T.; STRAUSS, A. Variation Of Shear Strength Of Masonry With Different Mortar Properties. *In*: North American Masonry Conference, 11., 2011, Minneapolis. **Anais [...]**. Fort Collins: TMS, 2011.

## APÊNDICE A – Resultados de análises e ensaios de caracterização dos materiais

### - Tijolos de solo-cimento

**Tabela A.1** – Tijolos de solo-cimento: análise FRX (%).

C	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	*	LOI
1,60	0,20	40,00	24,30	8,20	10,10	0,30	1,00	0,20	0,10	1,30	0,10	2,60	15,20

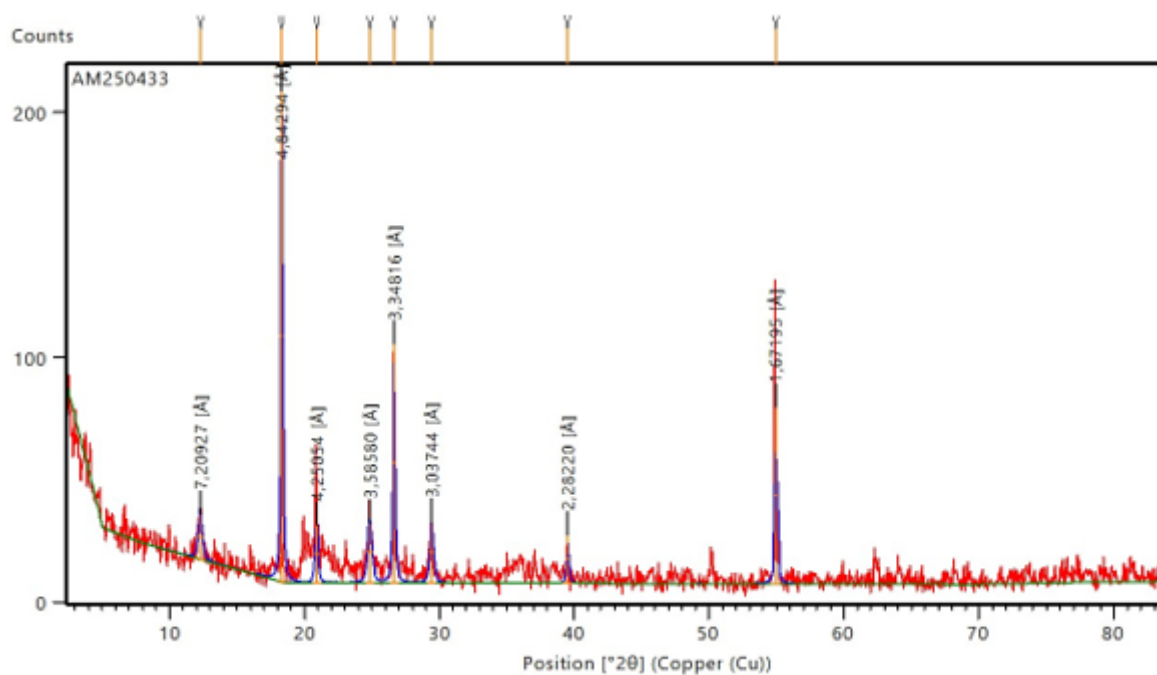
\*: Outros elementos.

LOI: *Loss on Ignition* (perda ao fogo).

**Quadro A.1** – Tijolos de solo-cimento: análise DRX.

Pico de difração (2θ)	Plano cristalino ( <i>d-spacing</i> , Å)	Mineral
~12,2°	7,20927	Argilomineral/Montmorilonita (Na,Ca) <sub>0.33</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub> · nH <sub>2</sub> O
~18,6°	4,84294	Portlandita (Ca(OH) <sub>2</sub> )
~20,8°	4,25054	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )
~24,8°	3,58580	Calcita (CaCO <sub>3</sub> )
~26,6°	3,34816	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )
~29,4°	3,03744	Calcita (CaCO <sub>3</sub> )
~39,5°	2,28220	Calcita (CaCO <sub>3</sub> )

**Figura A.1** – Tijolos de solo-cimento: perfil cristalográfico.



**Tabela A.2** – Tijolos de solo-cimento: análise dimensional.

Dimensão	Média (mm)	dp (mm)	CV (%)
Altura	70,08	0,11	0,16
Largura	125,03	0,55	0,44
Comprimento	250,11	0,11	0,04
Diâmetro do furo 1	55,02	0,06	0,12
Diâmetro do furo 2	55,04	0,06	0,12

**Tabela A.3** – Tijolos de solo-cimento: ensaio de absorção de água.

<b>Amostra</b>	<b>m<sub>1</sub> (g)</b>	<b>m<sub>2</sub> (g)</b>	<b>A<sub>CP</sub> (%)</b>	<b>A (%)</b>	<b>dp (%)</b>	<b>CV (%)</b>
CP1	3060	3620	18,30			
CP2	3000	3580	19,33	18,90	0,44	2,32
CP3	3040	3620	19,08			

**Tabela A.4** – Tijolos de solo-cimento: resistência à compressão.

	<b>Amostra</b>	<b>f<sub>máx</sub> (N)</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>f<sub>t, CP</sub> (MPa)</b>	<b>f<sub>t</sub> (MPa)</b>	<b>dp (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>Grupo A</b> Cimento CPIII 28 dias	CP1	69158	15625	4,43			
	CP2	69922	15625	4,48			
	CP3	67250	15625	4,30			
	CP4	98012	15625	6,27	4,79	0,66	13,82
	CP5	68777	15625	4,40			
	CP6	81143	15625	5,19			
	CP7	70074	15625	4,48			
<b>Grupo B</b> Cimento CPV-ARI 120 dias	CP8	104731	15625	6,70			
	CP9	92211	15625	5,90			
	CP10	89158	15625	5,71			
	CP11	101444	15625	6,49	6,10	0,49	8,06
	CP12	84883	15625	5,43			
	CP13	89692	15625	5,74			
	CP14	105268	15625	6,74			

## - Argamassa colante

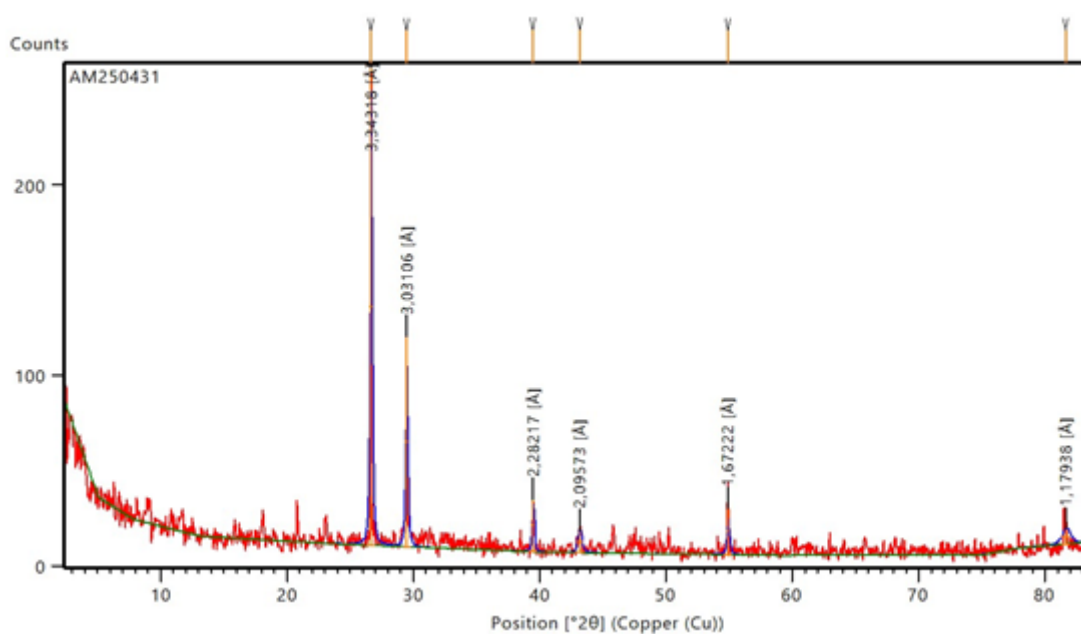
Tabela A.5 – Argamassa colante: análise FRX (%).

C	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	*	LOI
5,09	0,65	34,70	3,90	4,50	34,00	0,94	0,19	0,12	0,14	0,55	0,06	4,14	19,30

\*: Outros elementos.

LOI: *Loss on Ignition* (perda ao fogo).

Figura A.2 – Argamassa colante: perfil cristalográfico (DRX).



Quadro A.2 – Argamassa colante: análise DRX.

Pico de difração (2θ)	Plano cristalino (d-spacing, Å)	Mineral
~26.6°	3,34316	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )
~28.2°	3,03106	Calcita (CaCO <sub>3</sub> )
~42.4°	2,28217	Calcita (CaCO <sub>3</sub> )
~45.8°	2,09573	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )
~54.8°	1,67222	Calcita (CaCO <sub>3</sub> )
~81.8°	1,17938	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )

**Quadro A.3** – Argamassa colante: dados do fabricante.

<b>Classificação normativa (NBR 14.081)</b>	AC III
<b>Composição</b>	Cimento, agregados e aditivos químicos especiais
<b>Desempenho de aderência em cura normal (simula desempenho em ambientes internos)</b>	$\geq 1,0$ MPa
<b>Desempenho de aderência em cura submersa (simula desempenho em ambientes com umidade constante)</b>	$\geq 1,0$ MPa
<b>Desempenho de aderência em cura em estufa 70°C (simula desempenho em ambientes externos)</b>	$\geq 1,0$ MPa
<b>Tempo em aberto (20 min)</b>	$\geq 0,5$ MPa
<b>Temperatura de trabalho</b>	5°C - 40°C (do ar ambiente)
	5°C - 27°C (da superfície da base)
<b>Cor (pode ter variação devido às propriedades da matéria-prima mineral)</b>	cinza

Fonte: Saint-Gobain do Brasil (2024).

**Tabela A.6** – Argamassa colante: resistência à tração na flexão.

7 dias		14 dias		28 dias	
<b>R<sub>f</sub> (MPa)</b>	2,54	<b>R<sub>f</sub> (MPa)</b>	4,42	<b>R<sub>f</sub> (MPa)</b>	4,90
<b>dp (MPa)</b>	0,15	<b>dp (MPa)</b>	0,32	<b>dp (MPa)</b>	0,32
<b>CV (%)</b>	5,87	<b>CV (%)</b>	7,15	<b>CV (%)</b>	6,60

**Tabela A.7** – Argamassa colante: resistência à compressão.

7 dias		14 dias		28 dias	
<b>R<sub>c</sub> (MPa)</b>	8,46	<b>R<sub>c</sub> (MPa)</b>	10,62	<b>R<sub>c</sub> (MPa)</b>	11,88
<b>dp (MPa)</b>	0,73	<b>dp (MPa)</b>	0,30	<b>dp (MPa)</b>	0,84
<b>CV (%)</b>	8,58	<b>CV (%)</b>	2,84	<b>CV (%)</b>	7,04

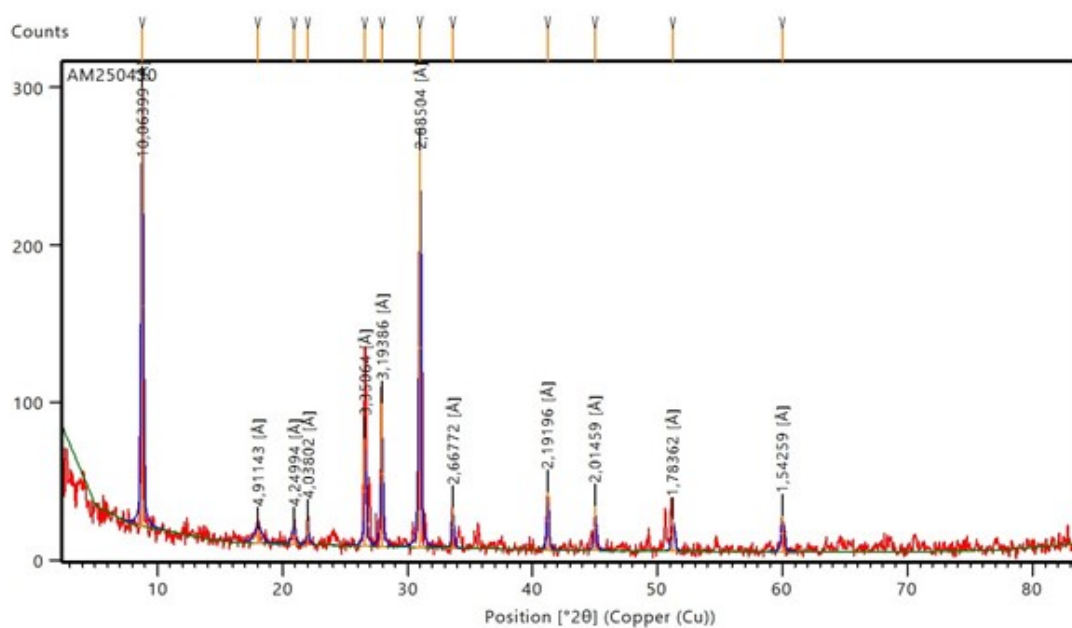
## - Argamassa polimérica

**Tabela A.8** – Argamassa polimérica: análise FRX (%).

C	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	LOI
15,10	0,06	11,30	1,58	0,74	25,50	17,00	0,07	0,03	0,26	0,26	0,02	41,81

LOI: *Loss on Ignition* (perda ao fogo).

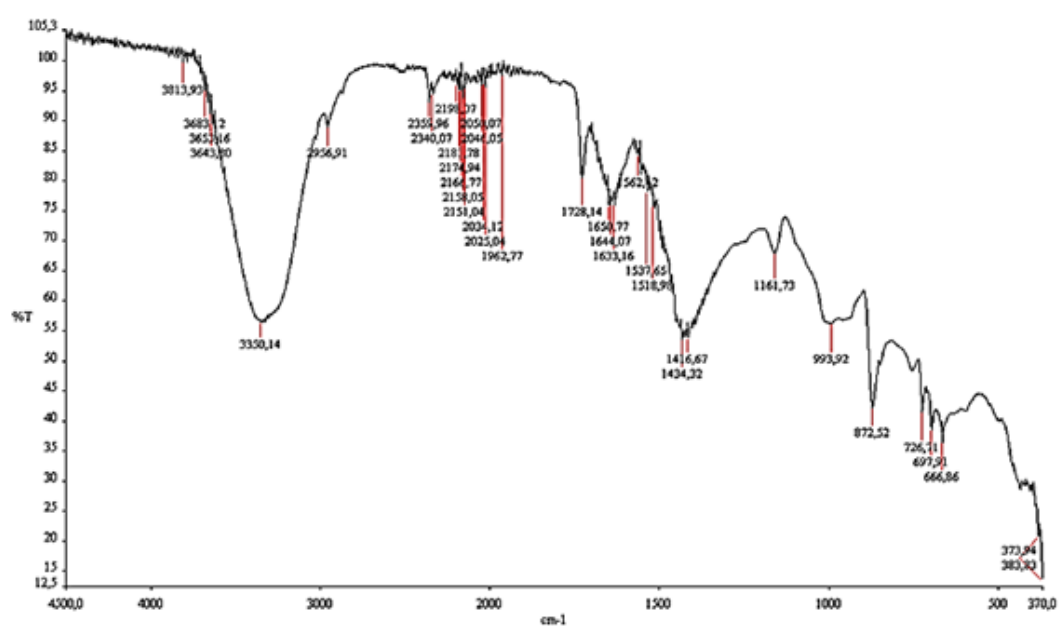
**Figura A.3** – Argamassa polimérica: perfil cristalográfico (DRX).



Quadro A.4 – Argamassa polimérica: análise DRX.

Pico de difração (2 $\theta$ )	Plano cristalino ( <i>d-spacing</i> , Å)	Mineral
~8.8°	10,06399	Argila (mica/muscovita)
~19.9°	4,91143	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )
~22.0°	4,24994	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )
~22.6°	4,03802	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )
~25.2°	3,35064	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )
~28.0°	3,19386	Silicato de cálcio hidratado (CSH)
~30.9°	2,88504	Silicato de cálcio hidratado (CSH) / Dolomita (CaMgCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
~33,6°	2,66772	Silicato de cálcio hidratado (CSH)
~41,2°	2,19196	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )
~45,0°	2,01459	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )
~51,5°	1,78362	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )
~59,7°	1,54259	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )

Figura A.4 – Argamassa polimérica: espectro de absorção no infravermelho.



**Quadro A.5** – Argamassa polimérica: espectroscopia por absorção no infravermelho.

<b>Banda de absorção (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Picos de absorção (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Grupos químicos</b>
3700 - 3200	3653,16, 3643,80, 3350,14, 3813,93	Ligação O-H (hidroxilas de álcoois ou água) ou N-H (aminas). Picos mais agudos podem indicar hidroxilas livres de minerais como a caulinita.
3000 - 2800	2956,91	Ligação C-H (estiramento de grupos metil e metileno). Indicativo de polímeros acrílicos, PVA e outros aditivos orgânicos.
1800 - 1500	1728,14, 1650,77, 1644,07, 1633,16, 1537,63, 1518,99	Ligação C=O (carbonila) de ésteres ou ácidos carboxílicos, característico de polímeros acrílicos ou PVA. Sobreposições podem indicar amidas ou anéis aromáticos.
1500 - 600	1416,67, 1434,32, 993,92, 872,52, 726,31, 693,91, 666,86, 373,94, 385,82	Deformação de C-H (banda em ~1400 cm <sup>-1</sup> ). Ligação Si-O-Si ou Si-O-Al de silicatos (bandas fortes em ~1000 cm <sup>-1</sup> e ~800 cm <sup>-1</sup> ), indicando a presença de componentes minerais inorgânicos (sílica, argila).

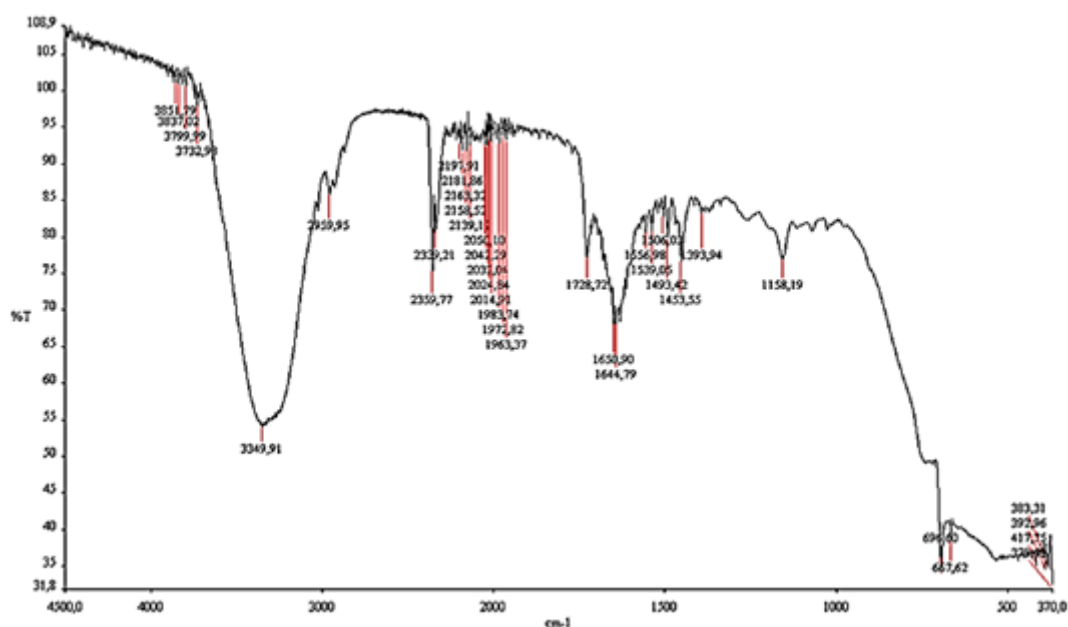
**Quadro A.6** – Argamassa polimérica: dados do fabricante.

<b>Base polimérica</b>	Resina acrílica estirenada
<b>Densidade</b>	1,85 g/cm <sup>3</sup>
<b>Cor</b>	cinza claro (sujeito à variação de cor por utilizar matéria prima de origem natural)
<b>Resistência à tração</b>	≥ 0,9 MPa
<b>Análise termogravimétrica</b>	18% (25 a 12°C)
	52% (acima de 850°C)

Fonte: DVG Precon (s.d.).

## - Cola acrílica

Figura A.5 – Cola acrílica: espectro de absorção no infravermelho.



Quadro A.7 – Cola acrílica: espectroscopia por absorção no infravermelho.

Banda de absorção (cm <sup>-1</sup> )	Picos de absorção (cm <sup>-1</sup> )	Grupos químicos
3700 - 3200	3853,79, 3857,70, 3799,89, 3349,91	Ligação O-H (hidroxilas). Indicativo de água residual e/ou grupos hidroxila na cadeia polimérica.
3000 - 2800	2959,95	Ligação C-H (estiramento de grupos metil e metileno). Característico de compostos orgânicos e polímeros.
1800 - 1500	1728,72, 1650,90, 1644,79, 1506,03, 1539,05	Ligação C=O (carbonila) de ésteres. Principal indicação de um polímero acrílico. Picos em ~1650-1500 cm <sup>-1</sup> podem indicar água de hidratação ou outros aditivos.
1500 - 600	1493,42, 1453,55, 1158,19, 696,80, 667,62, 383,31	Deformação angular de C-H (dobramento de grupos metil e metileno). Ligação C-O de ésteres (pico em ~1158 cm <sup>-1</sup> ). A ausência de picos fortes entre 1100-800 cm <sup>-1</sup> (silicatos) confirma a natureza predominantemente orgânica do material.

**Quadro A.8** – Cola acrílica: dados do fabricante.

<b>Aspecto</b>	Branco leitoso, translúcido quanto totalmente curado
<b>Aplicação</b>	Assentamento de tijolos modulares compostos por: solo-cimento, filito, pó de pedra, areia, argila, materiais de demolição ou quaisquer misturas entre estes materiais na composição dos tijolos. Colagem de materiais porosos diversos.
<b>Características físico-químicas</b>	
<b>Resistência à tração</b>	$\geq 45000 \text{ kgf/m}^2$
<b>Alongamento</b>	$\geq 15\%$
<b>Teor de sólidos</b>	47% - 51%
<b>Viscosidade RVT (25°C)</b>	4000% - 9000%
<b>pH (25°C)</b>	7,5 - 9,5
<b>Gravidade específica</b>	1,02 g/cm <sup>3</sup>
<b>Temp. de ebulição/intervalo</b>	60 - 100°C
<b>Ponto de inflamação</b>	> 100°C

**APÊNDICE B – Curvas tensão-deformação das juntas, segundo o material de assentamento; análise de deformações por Correlação de Imagens Digitais (DIC)**

**Figura B.1 – Prismas AC;  $\sigma_c = 0,1$  MPa.**

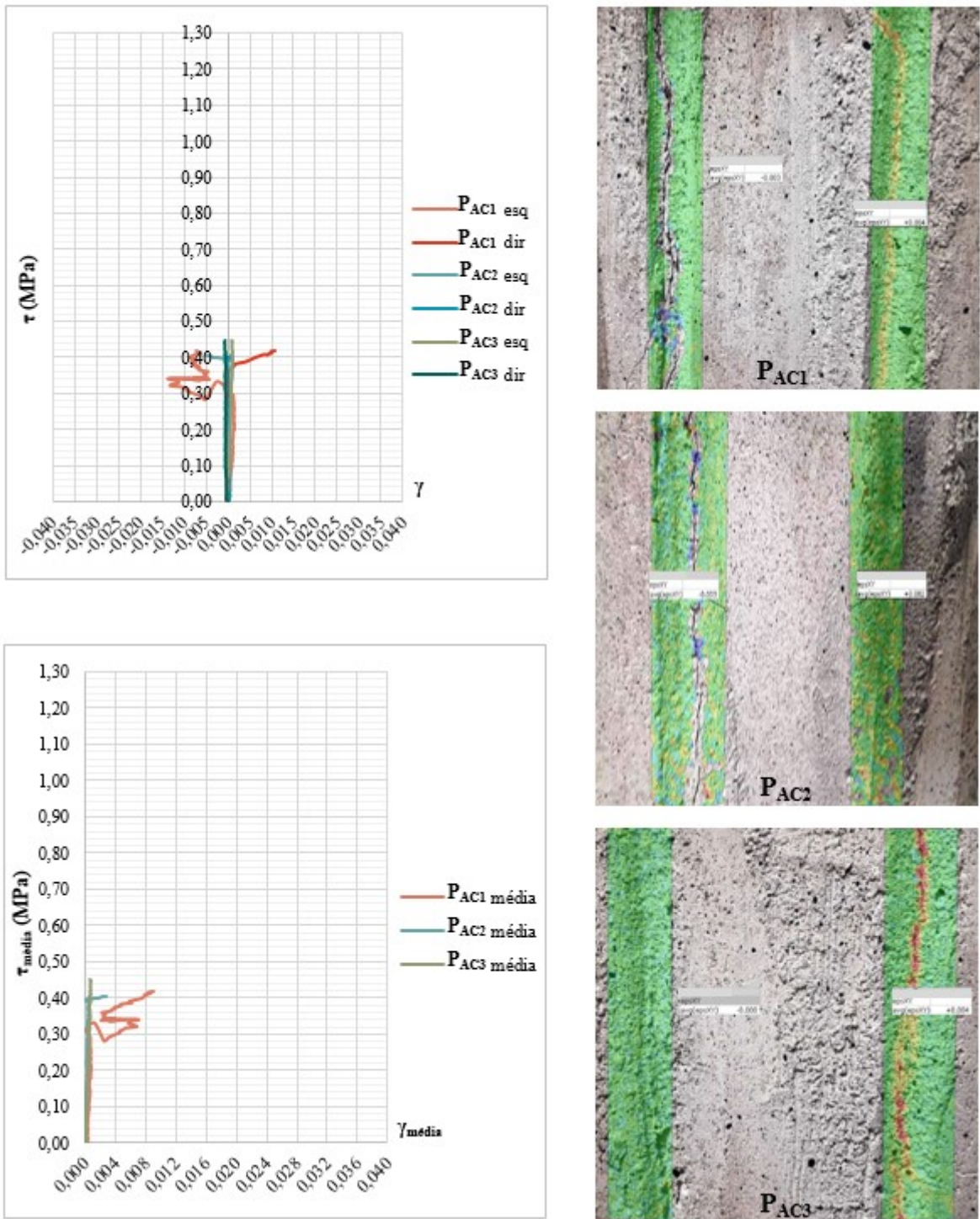


Figura B.2 – Prismas AP;  $\sigma_c = 0,1$  MPa.

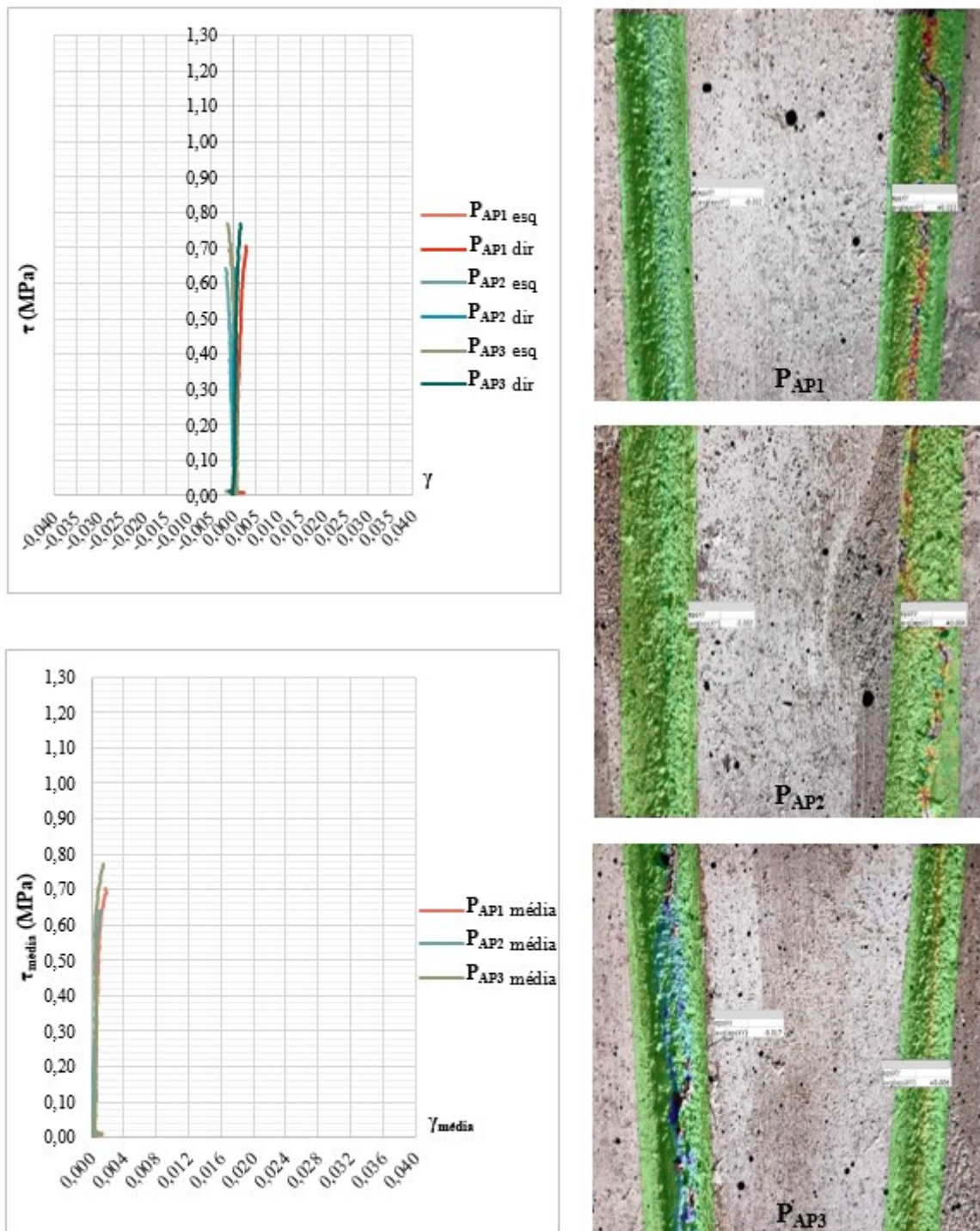


Figura B.3 – Prismas CA;  $\sigma_c = 0,1$  MPa.

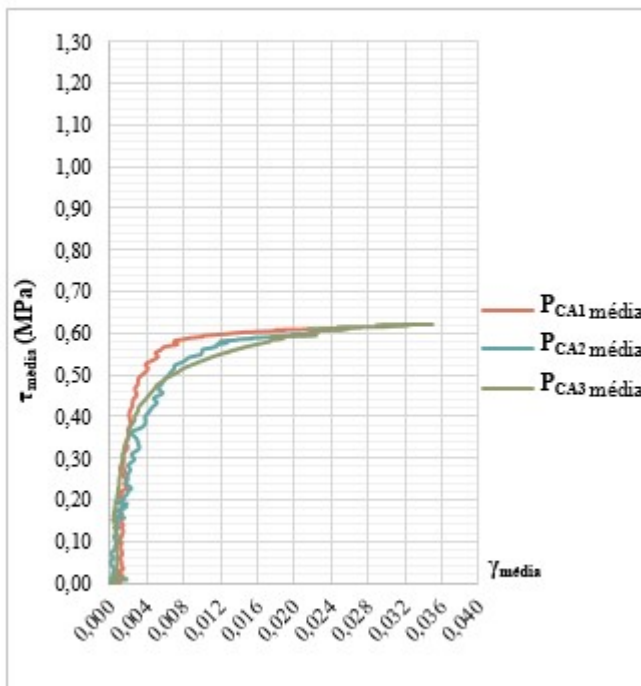
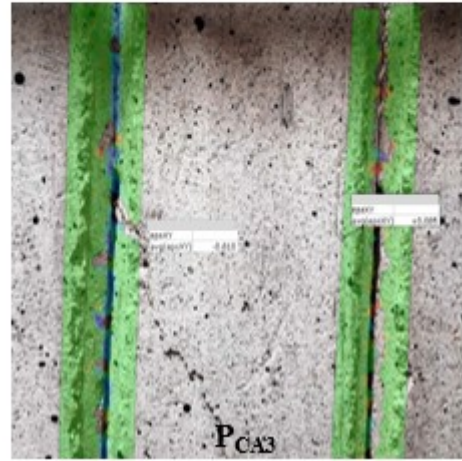
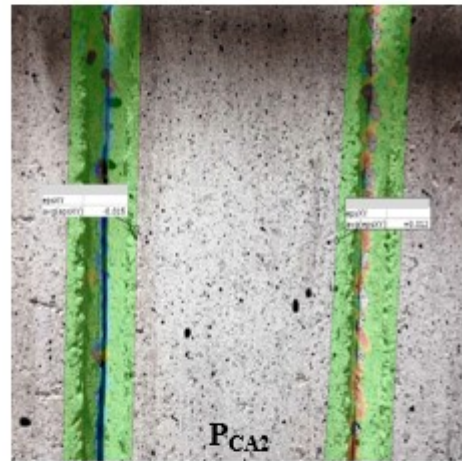
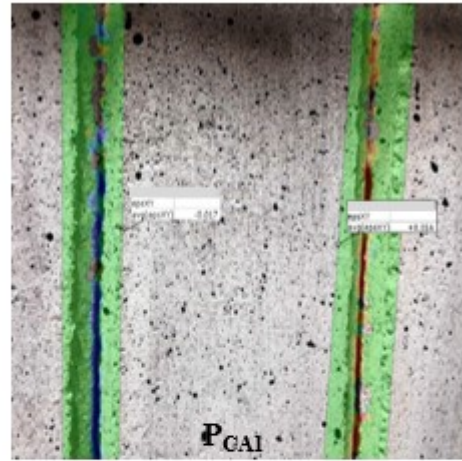
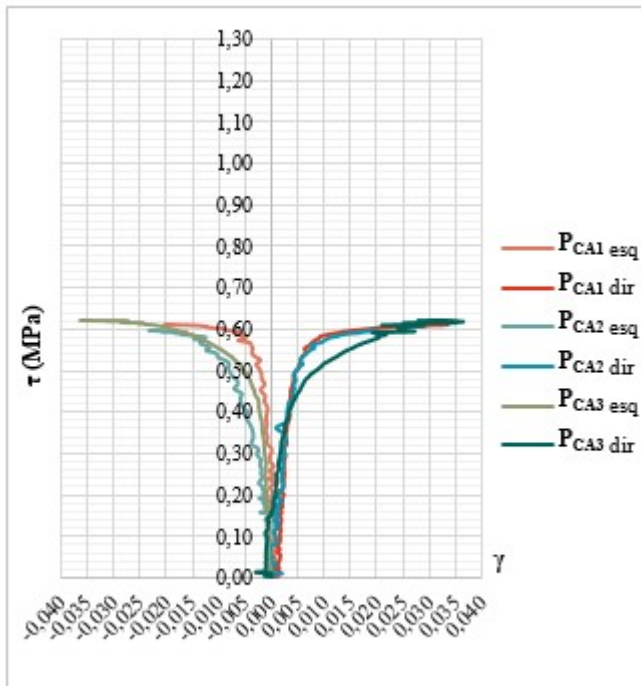


Figura B.4 – Prismas AC;  $\sigma_c = 0,3$  MPa.

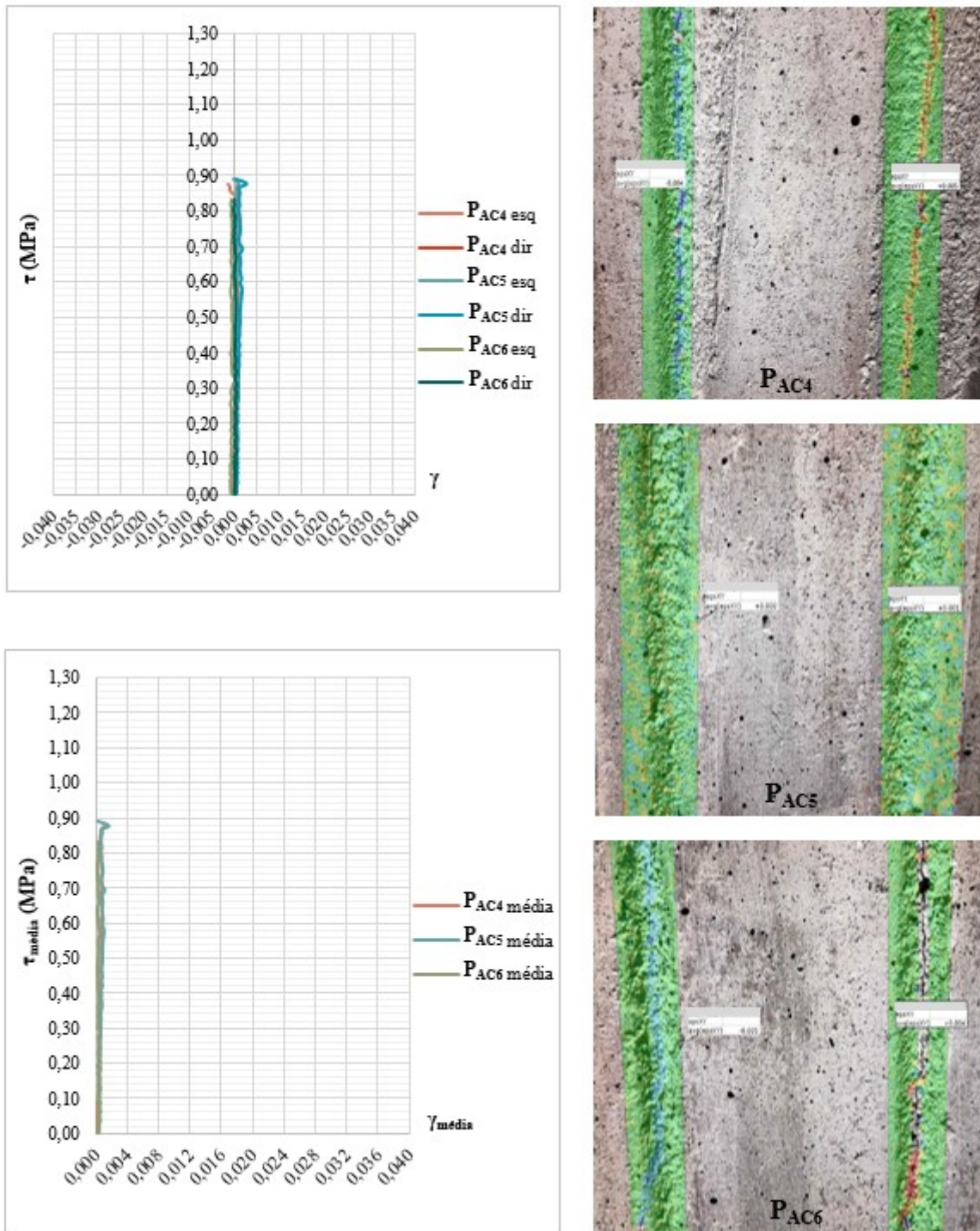


Figura B.5 – Prismas AP;  $\sigma_c = 0,3 \text{ MPa}$ .

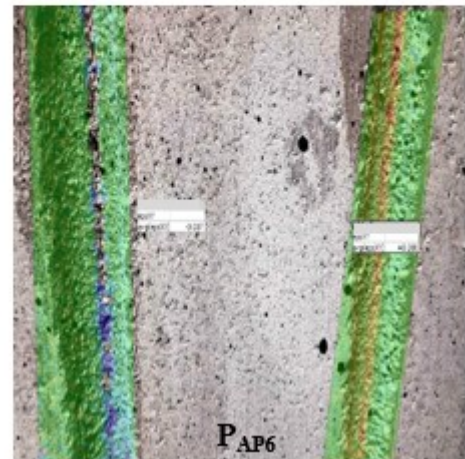
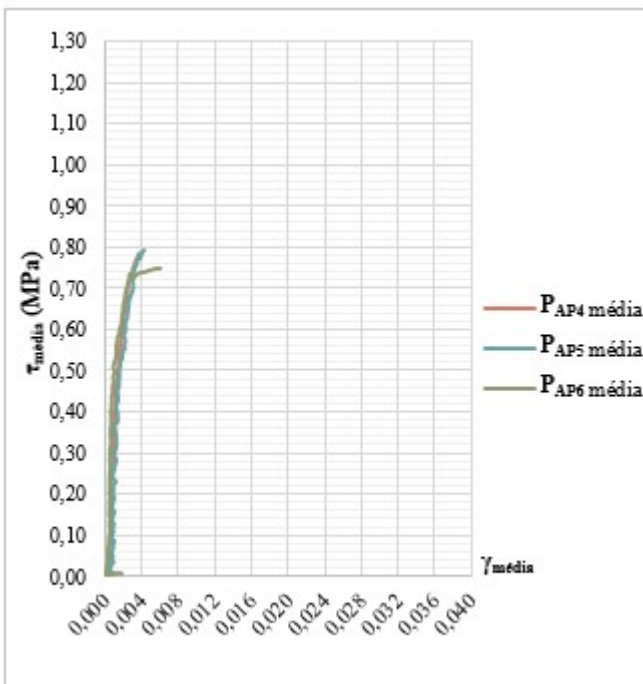
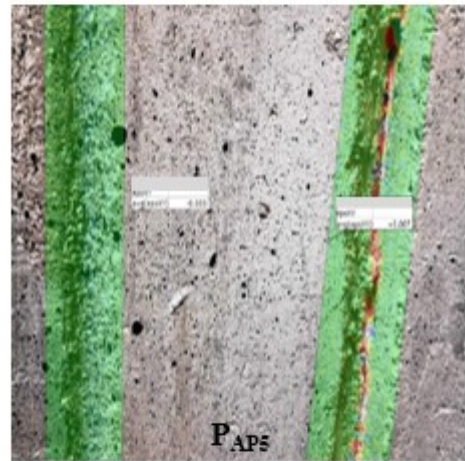
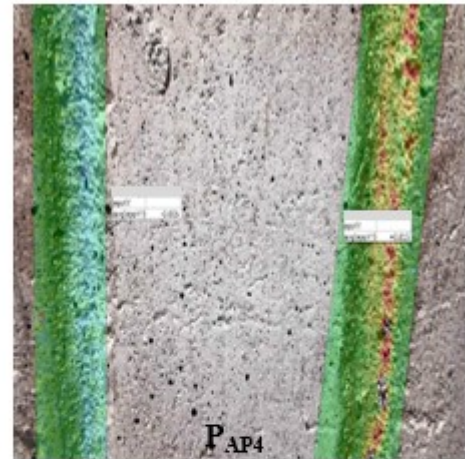
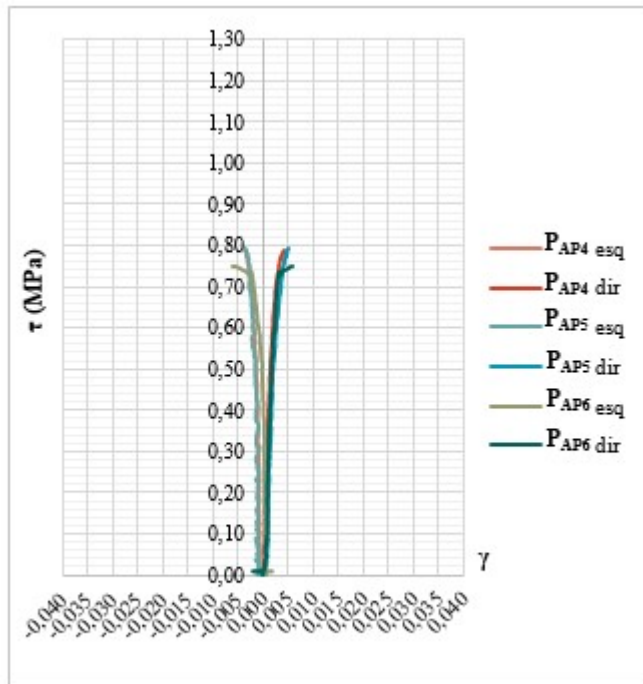


Figura B.6 – Prismas CA;  $\sigma_c = 0,3$  MPa.

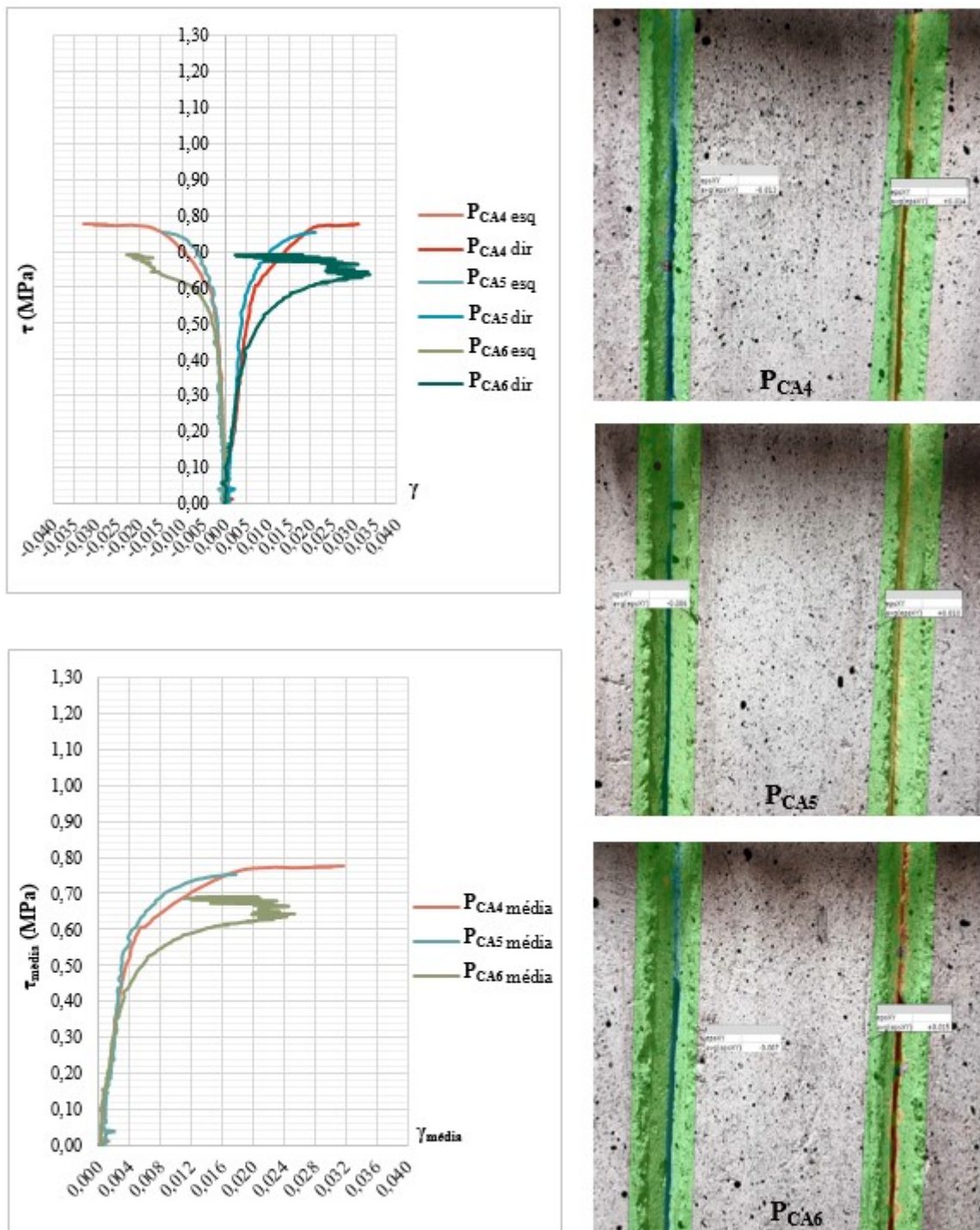


Figura B.7 – Prismas AC;  $\sigma_c = 0,5$  MPa.

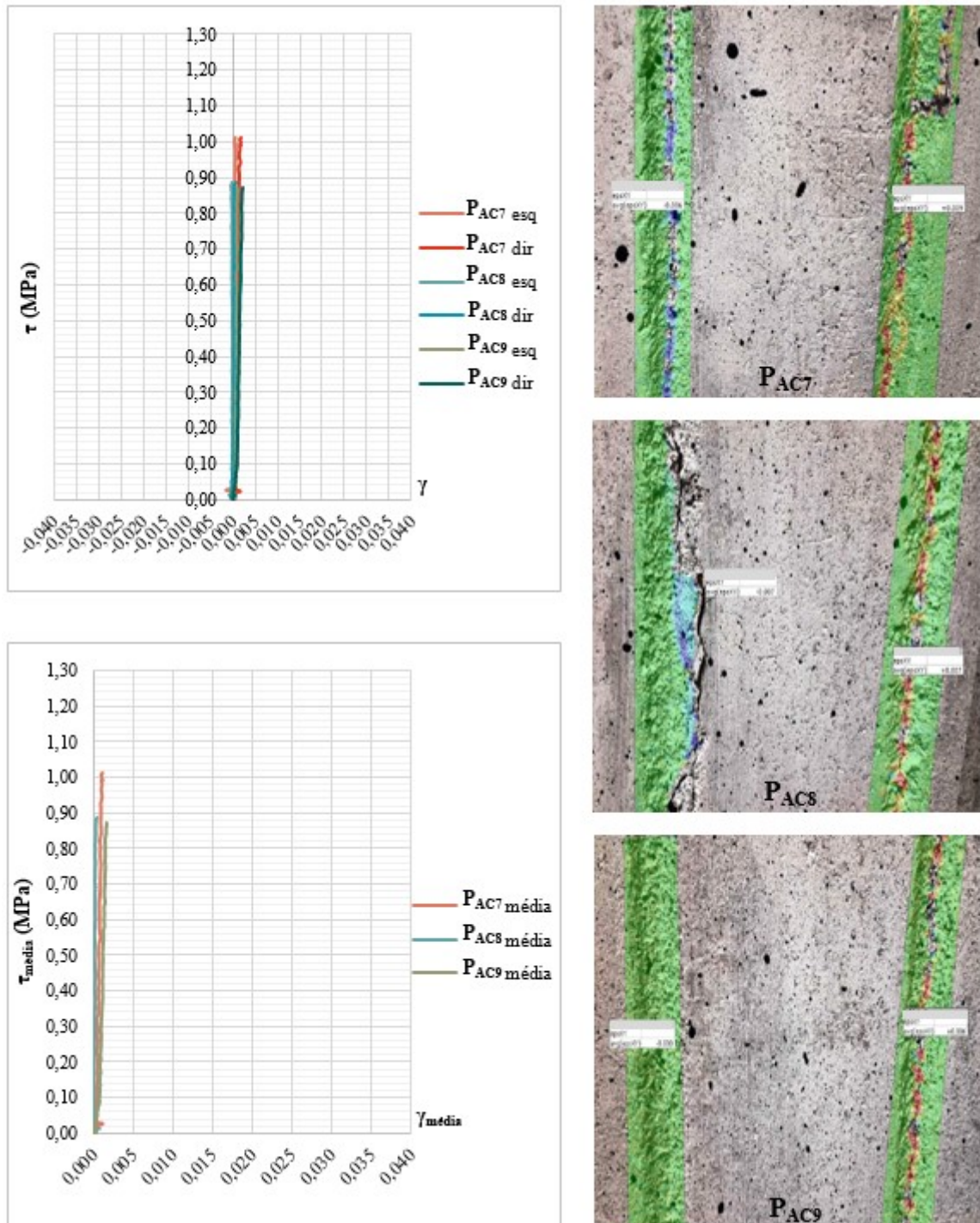


Figura B.8 – Prismas AP;  $\sigma_c = 0,5 \text{ MPa}$ .

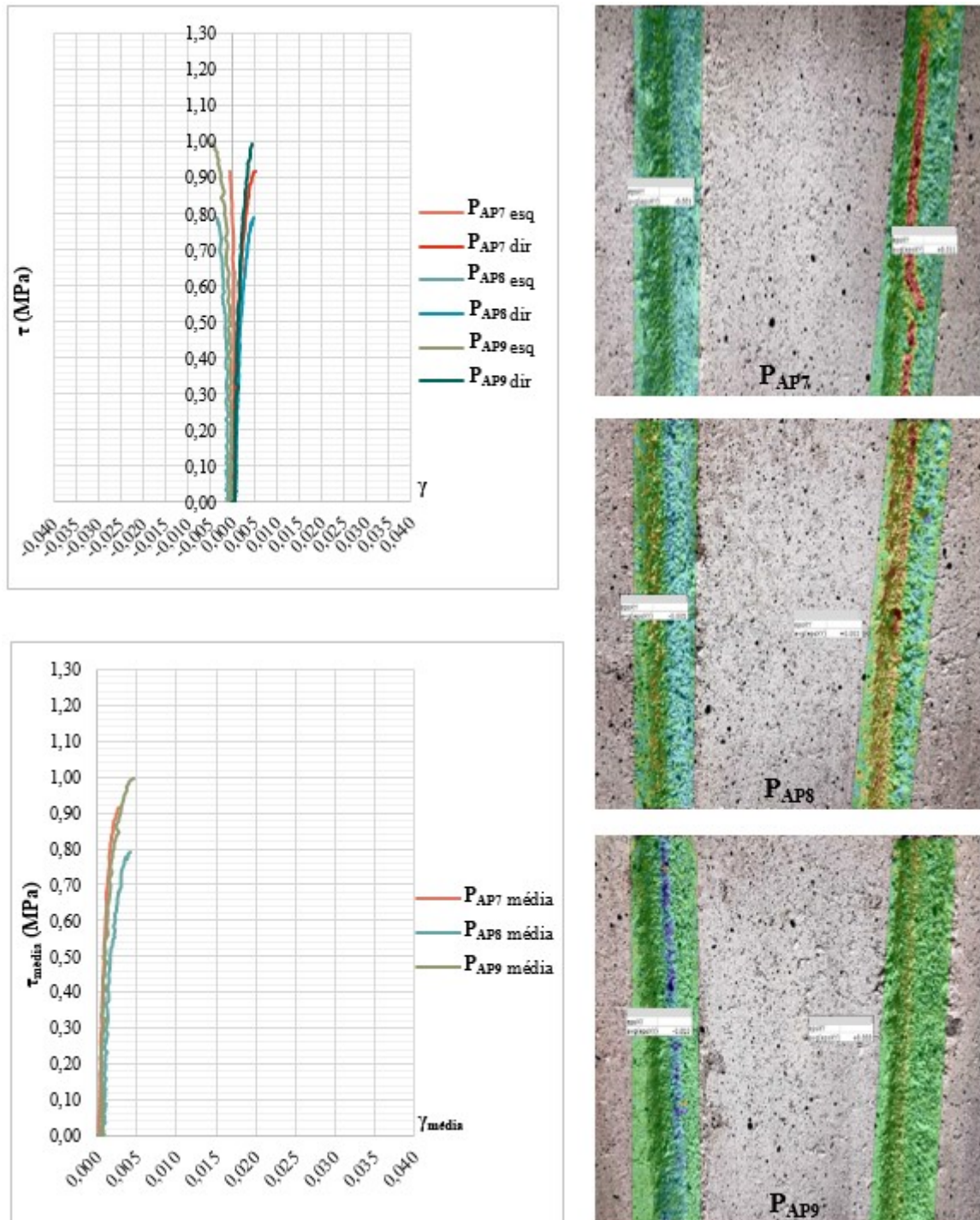
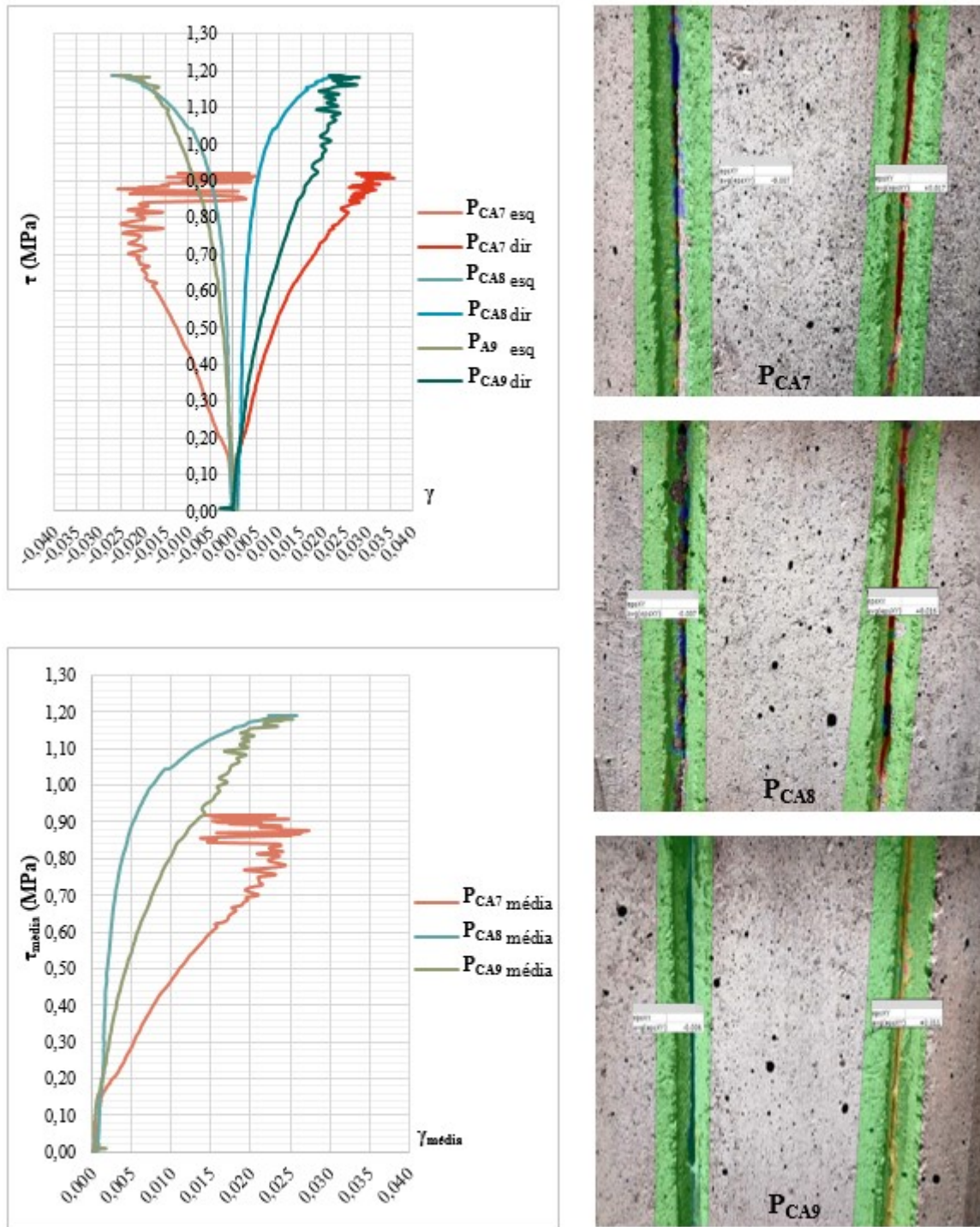


Figura B.9 – Prismas CA;  $\sigma_c = 0,5$  MPa.



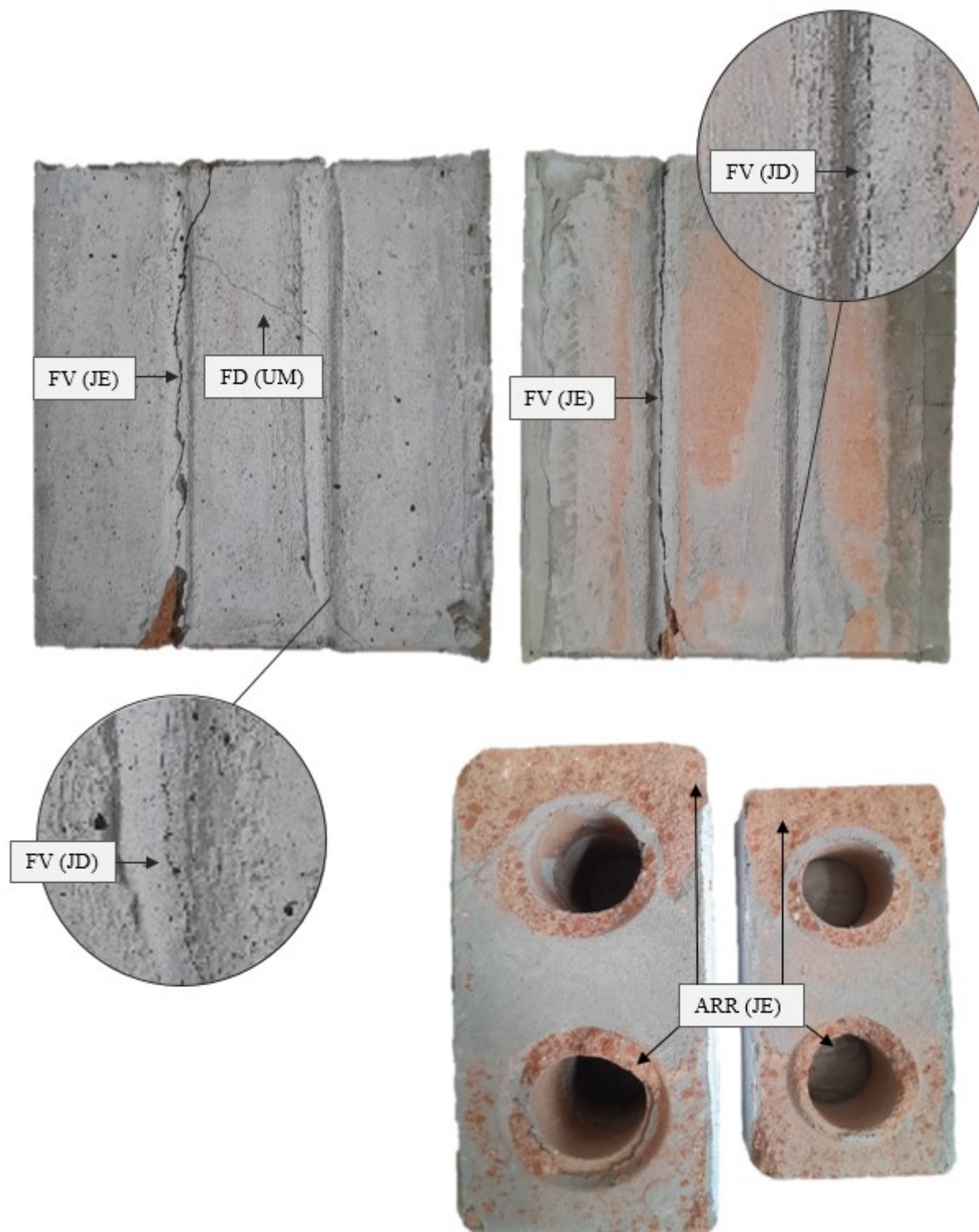
**APÊNDICE C – Padrão de falha dos prismas após ensaios de resistência ao cisalhamento**

**- Prismas AC**

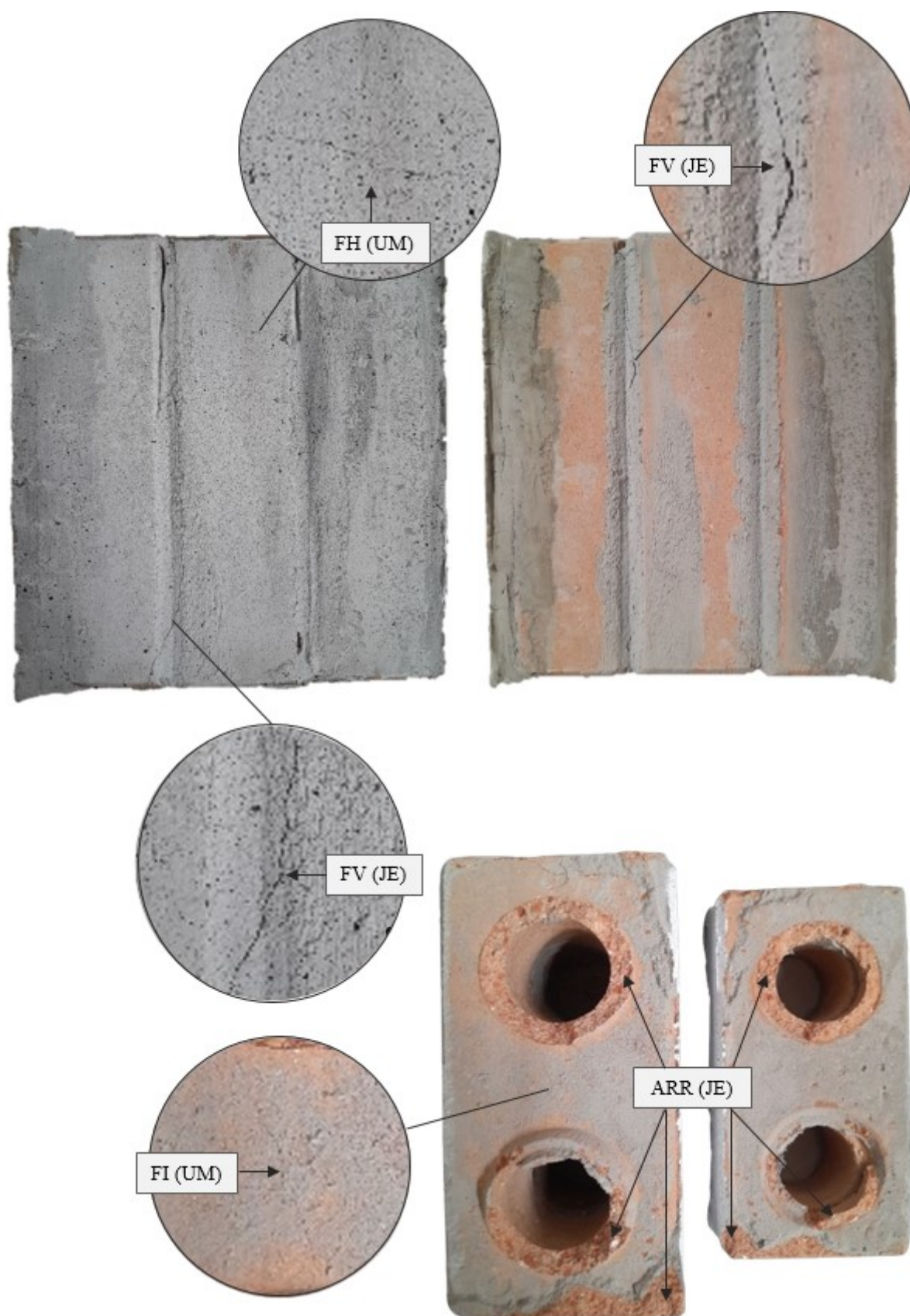
**Figura C.1 – Padrões de fissuração dos prismas AC após a ruptura por cisalhamento.**



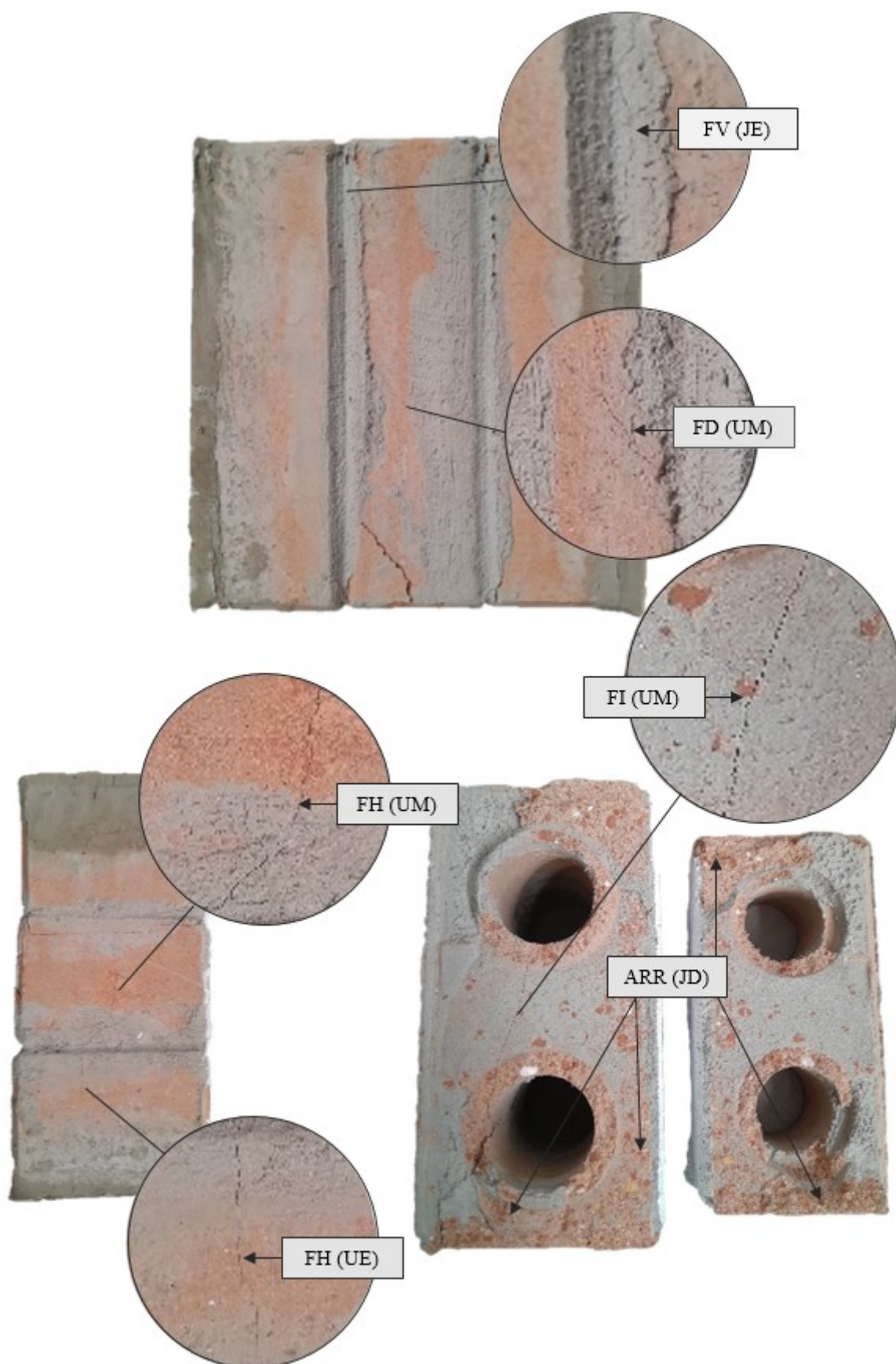
**Figura C.2** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{ACI}$  ( $\sigma_c = 0,1$  MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); diagonal, FD(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JE).



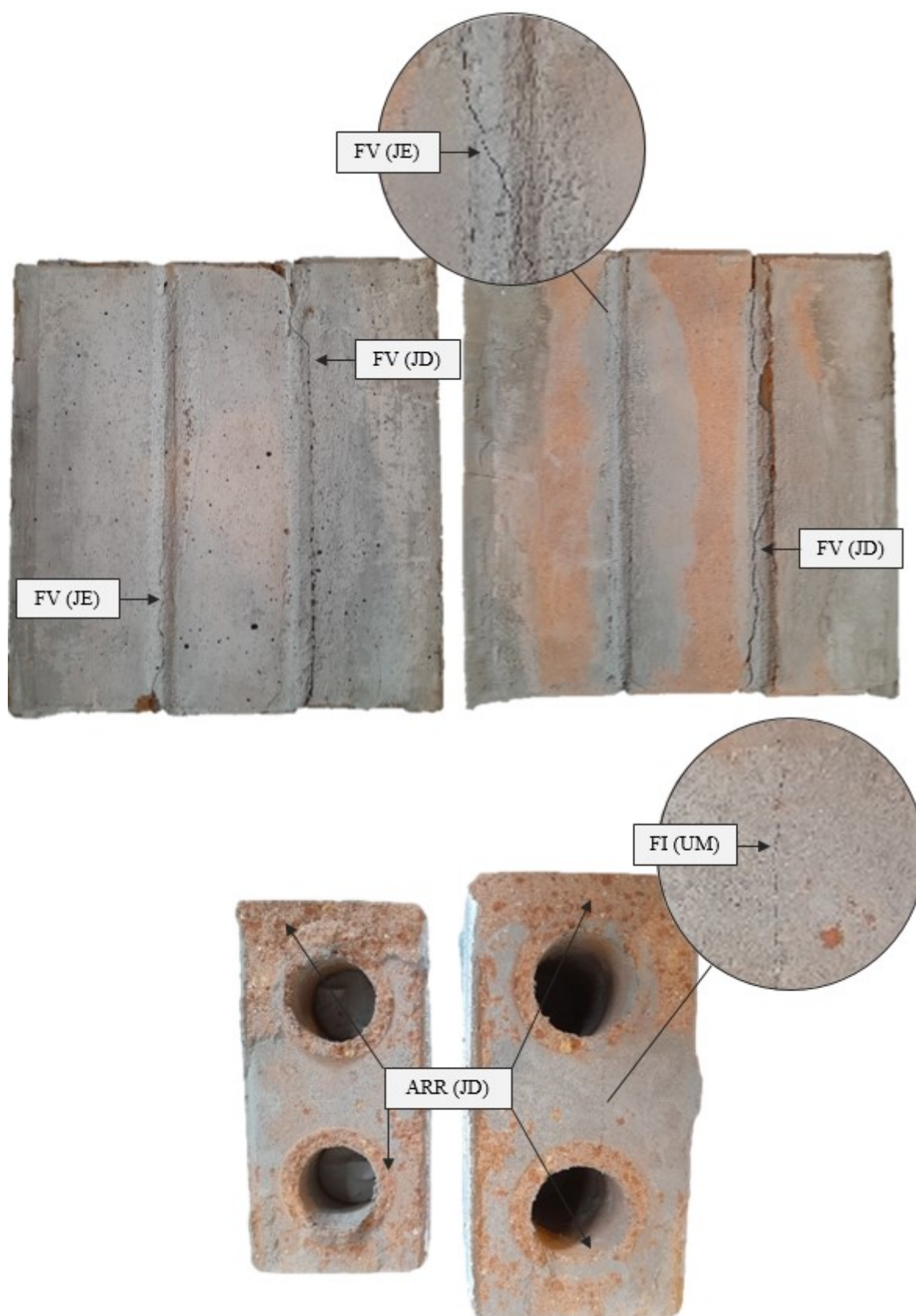
**Figura C.3** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AC2}$  ( $\sigma_c = 0,1$  MPa), evidenciando fissuras: vertical, FV(JE); horizontal e interna, FH+FI(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JE).



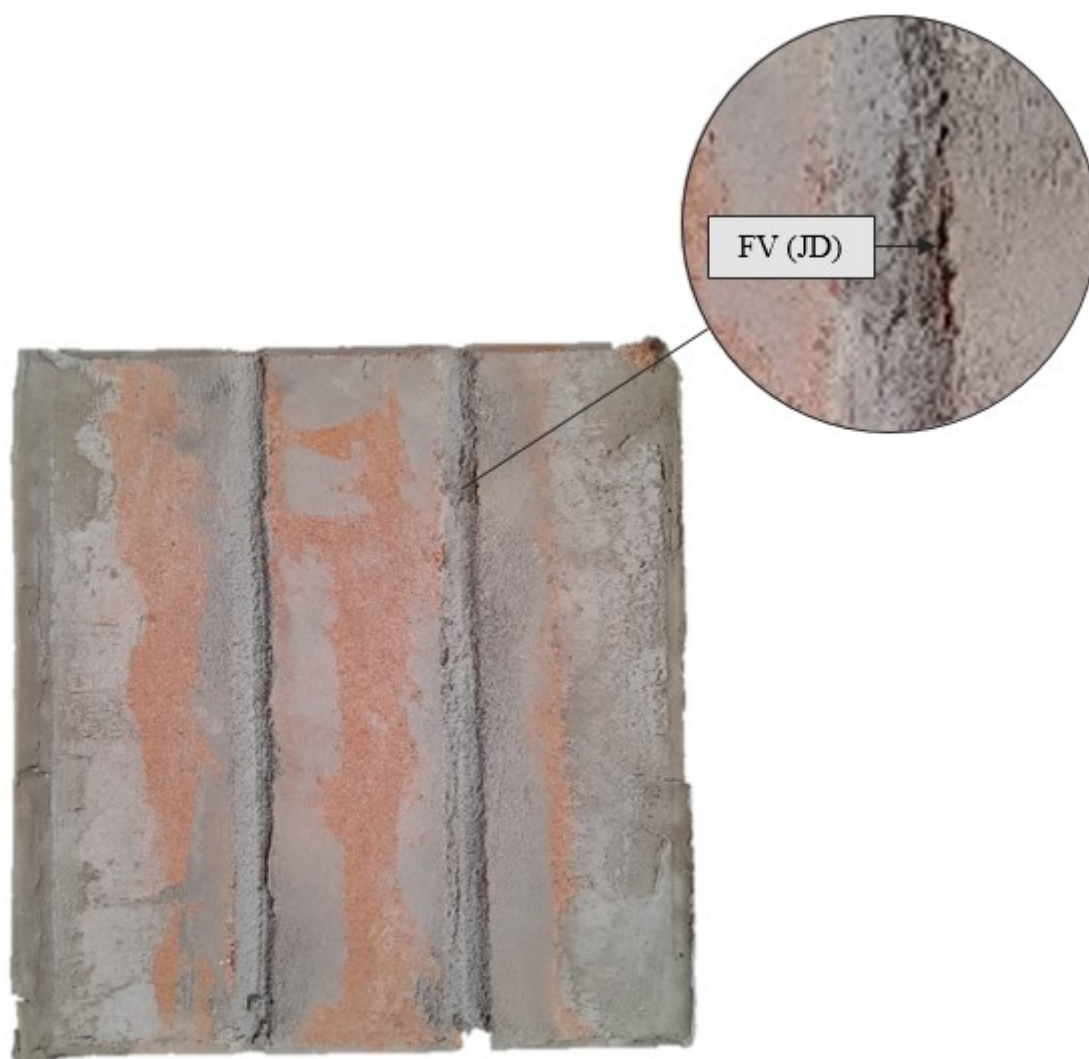
**Figura C.4** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AC3}$  ( $\sigma_c = 0,1$  MPa), evidenciando fissuras: vertical, FV(JE); horizontais (UE+UM), interna e diagonal, FI+FD(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD).



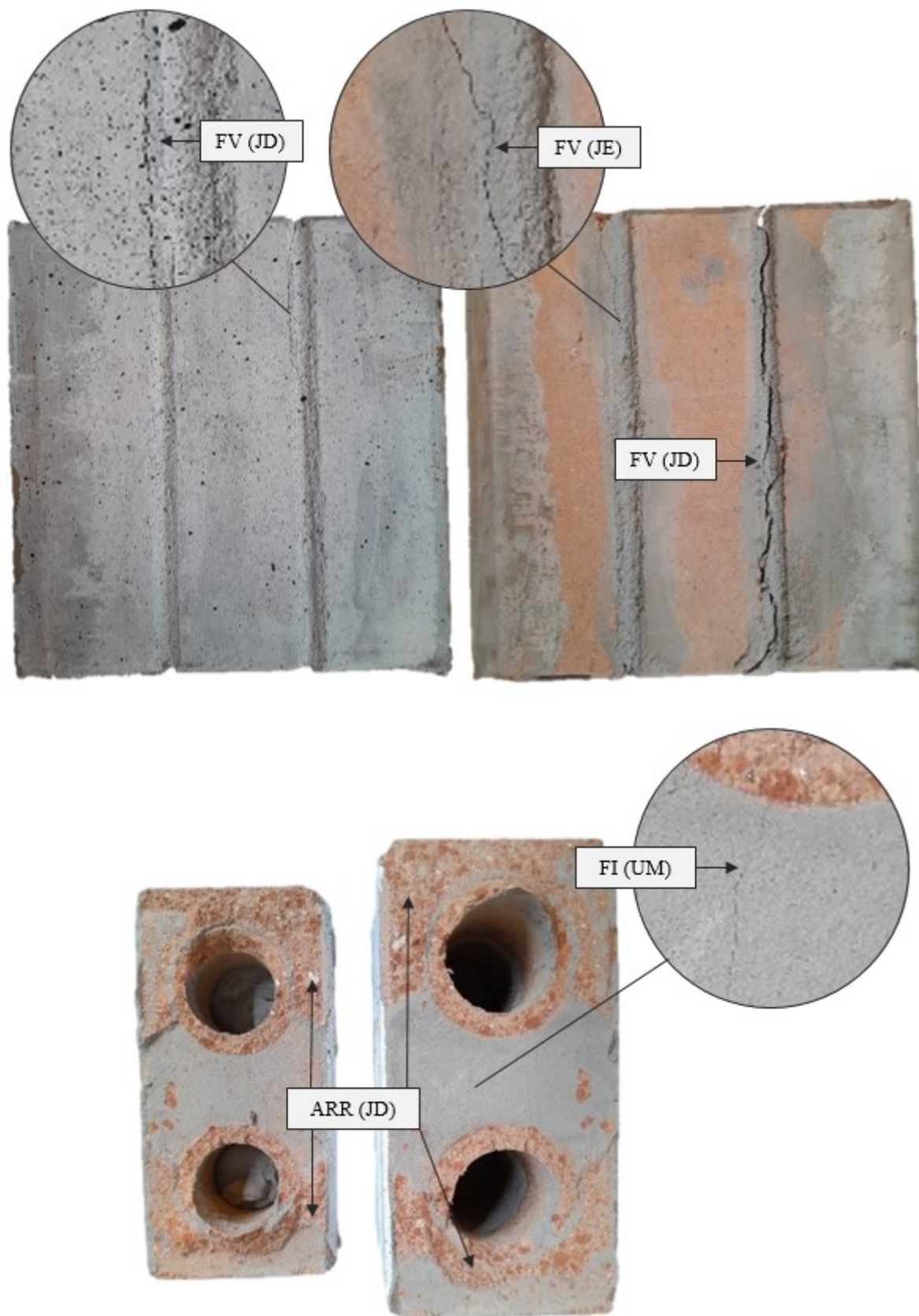
**Figura C.5** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AC4}$  ( $\sigma_c = 0,3$  MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); interna FI(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD).



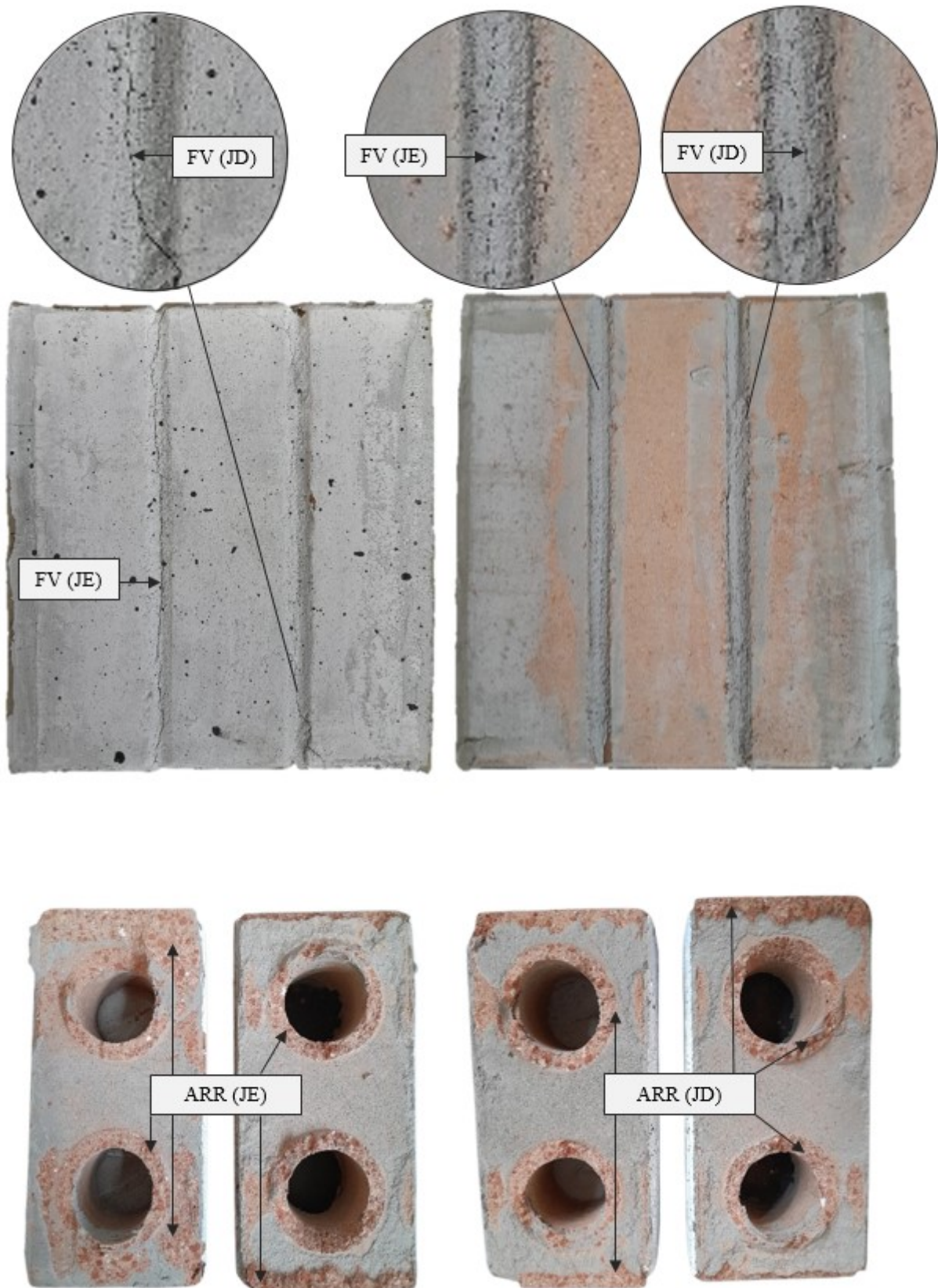
**Figura C.6** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AC5}$  ( $\sigma_c = 0,3$  MPa), evidenciando fissuras: vertical, FV(JD).



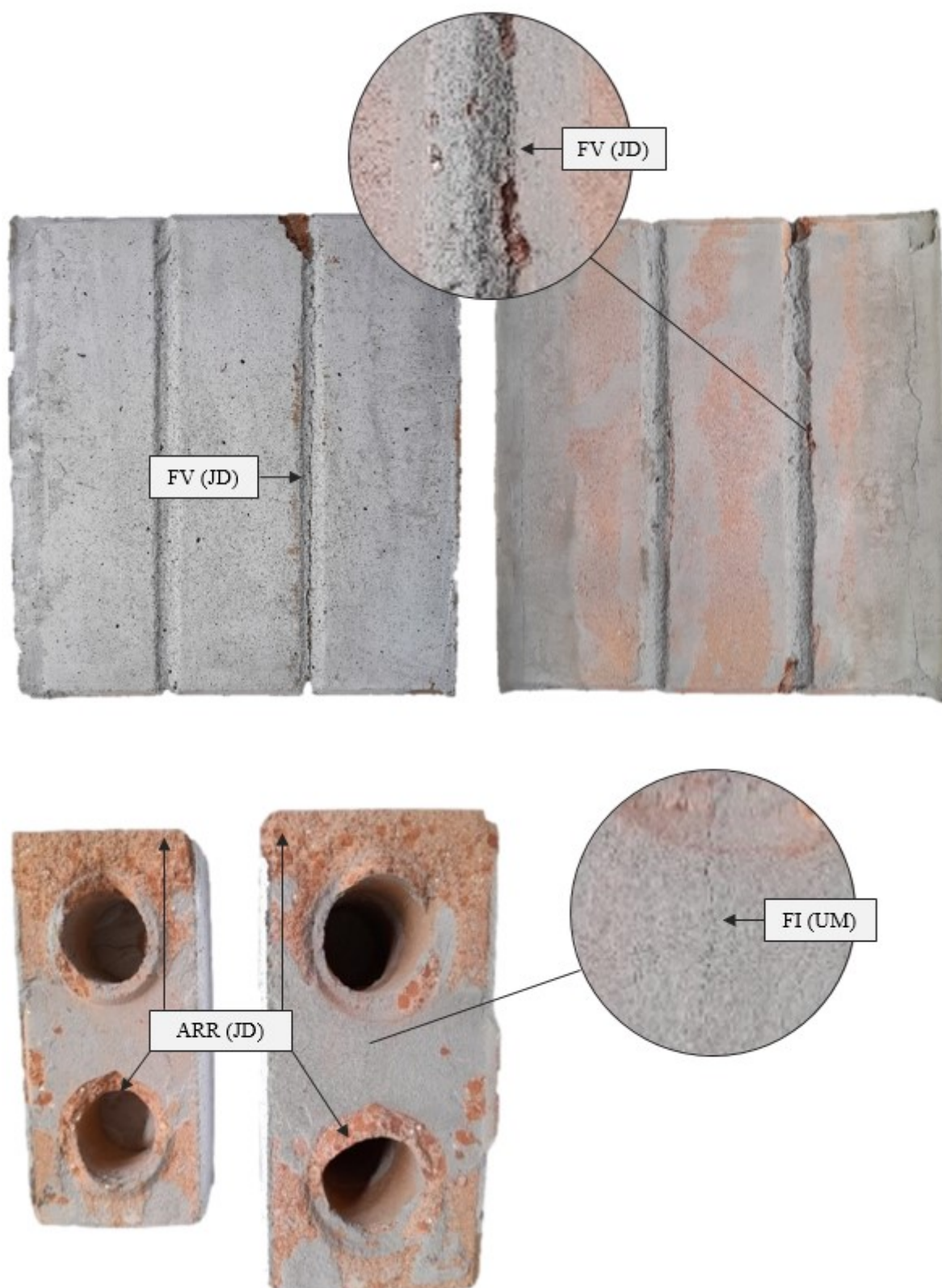
**Figura C.7** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AC6}$  ( $\sigma_c = 0,3$  MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); interna FI(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD).



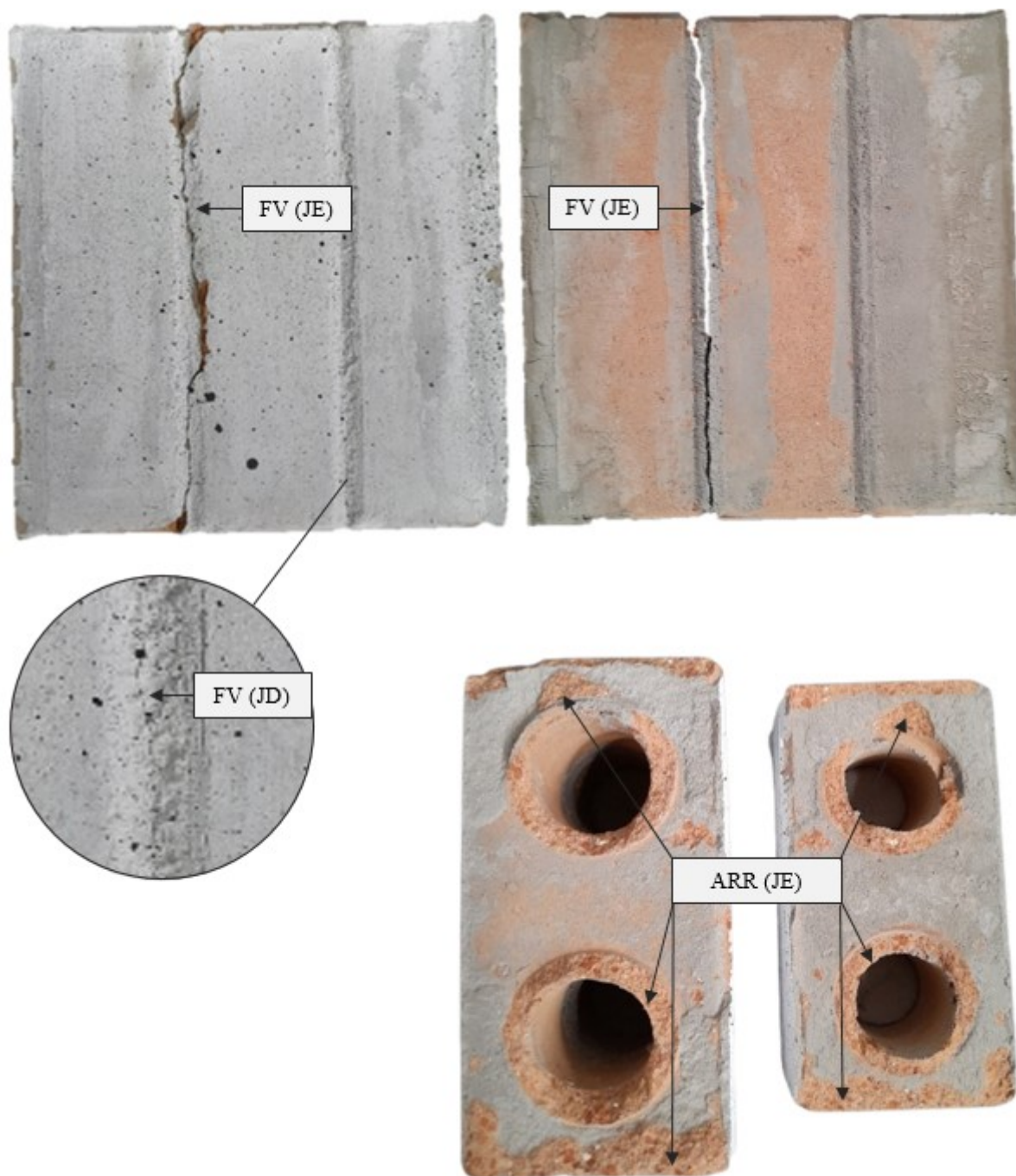
**Figura C.8** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AC7}$  ( $\sigma_c = 0,5$  MPa), evidenciando fissuras verticais, FV(JE+JD); separação e arrancamento de material nas interfaces, ARR(JE+JD).



**Figura C.9** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AC8}$  ( $\sigma_c = 0,5$  MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JD); interna, FI(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD).

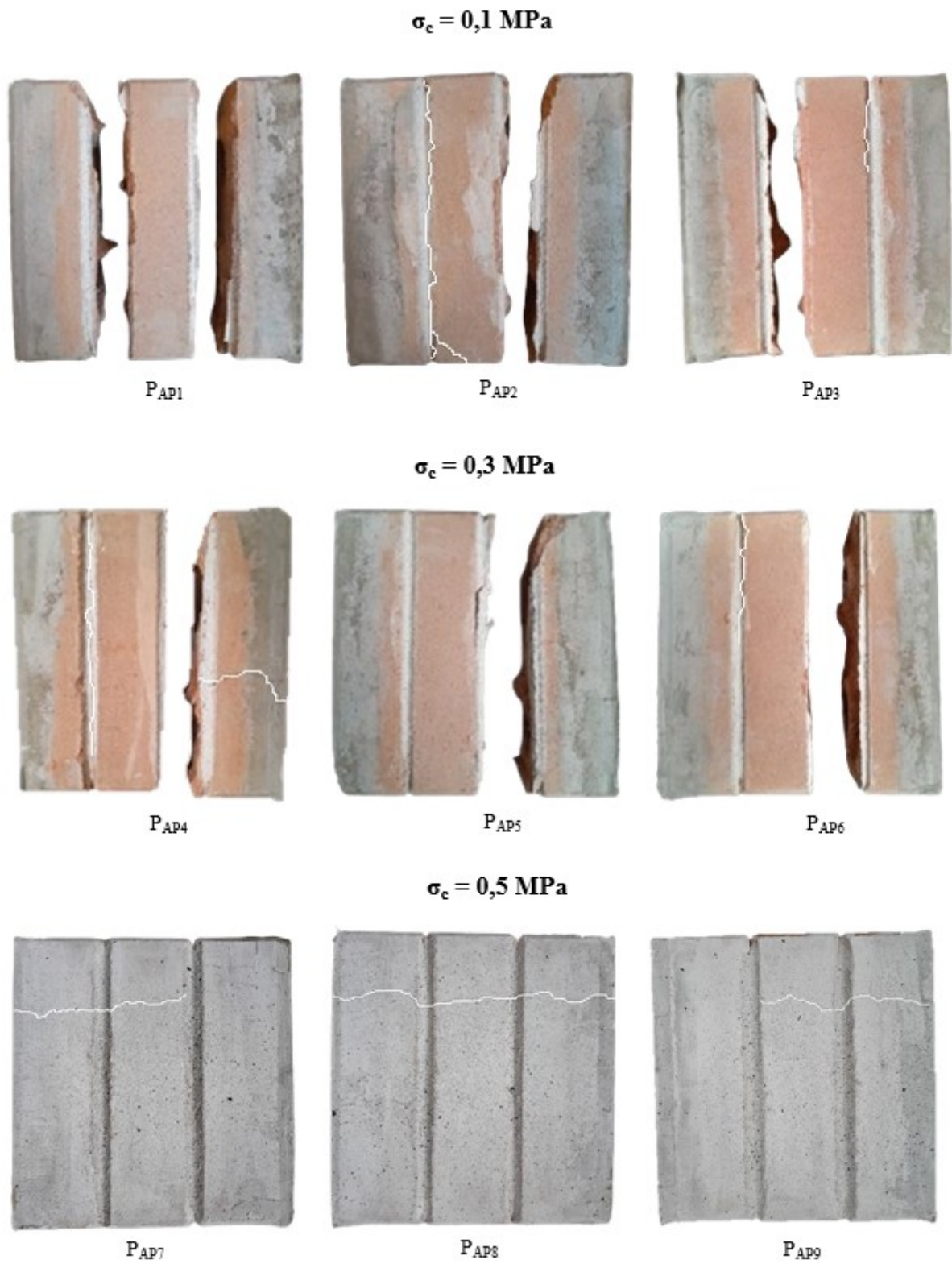


**Figura C.10** – Registro detalhado do modo de falha do prisma P<sub>AC9</sub> ( $\sigma_c = 0,5$  MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JE).

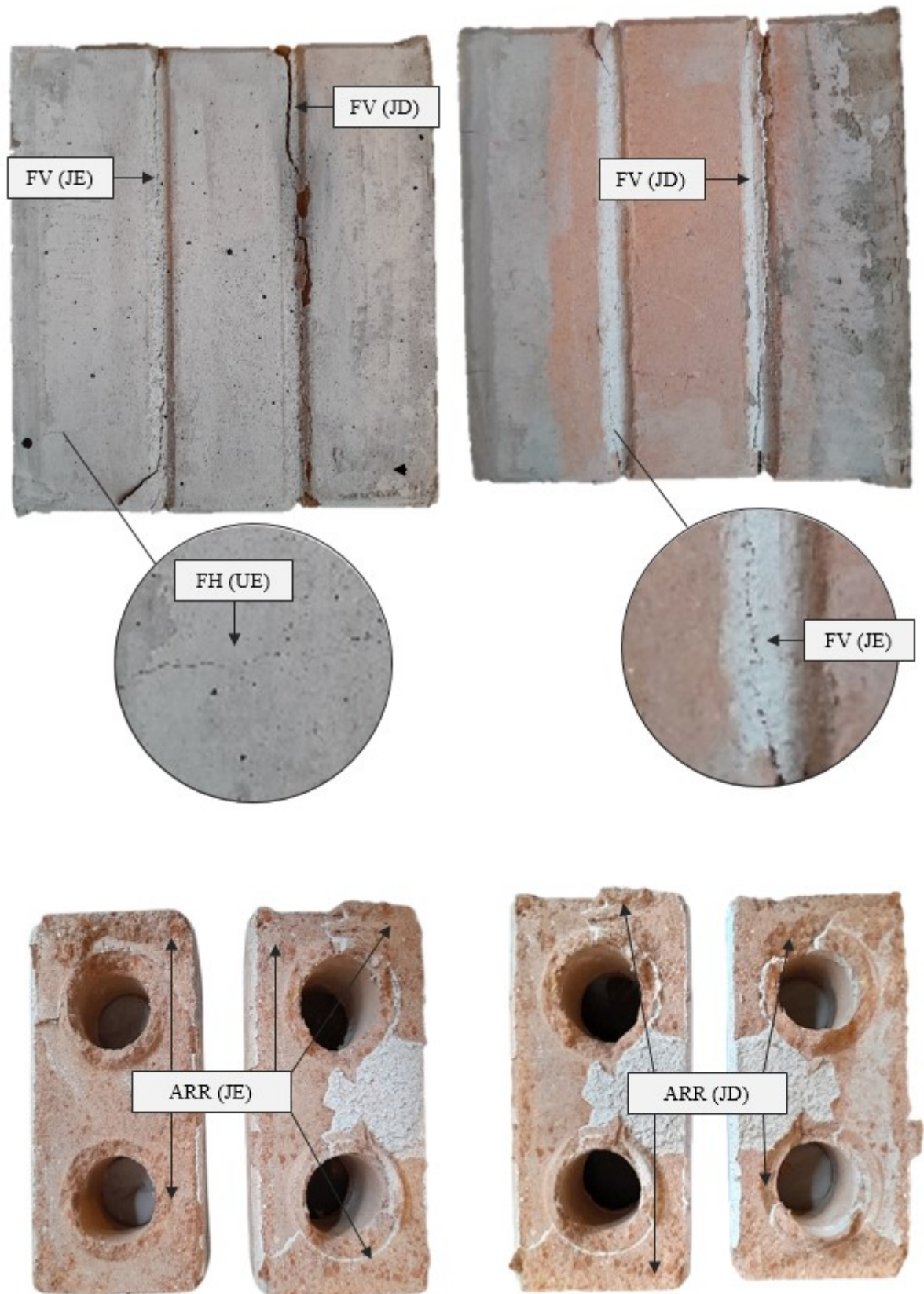


- Prismas AP

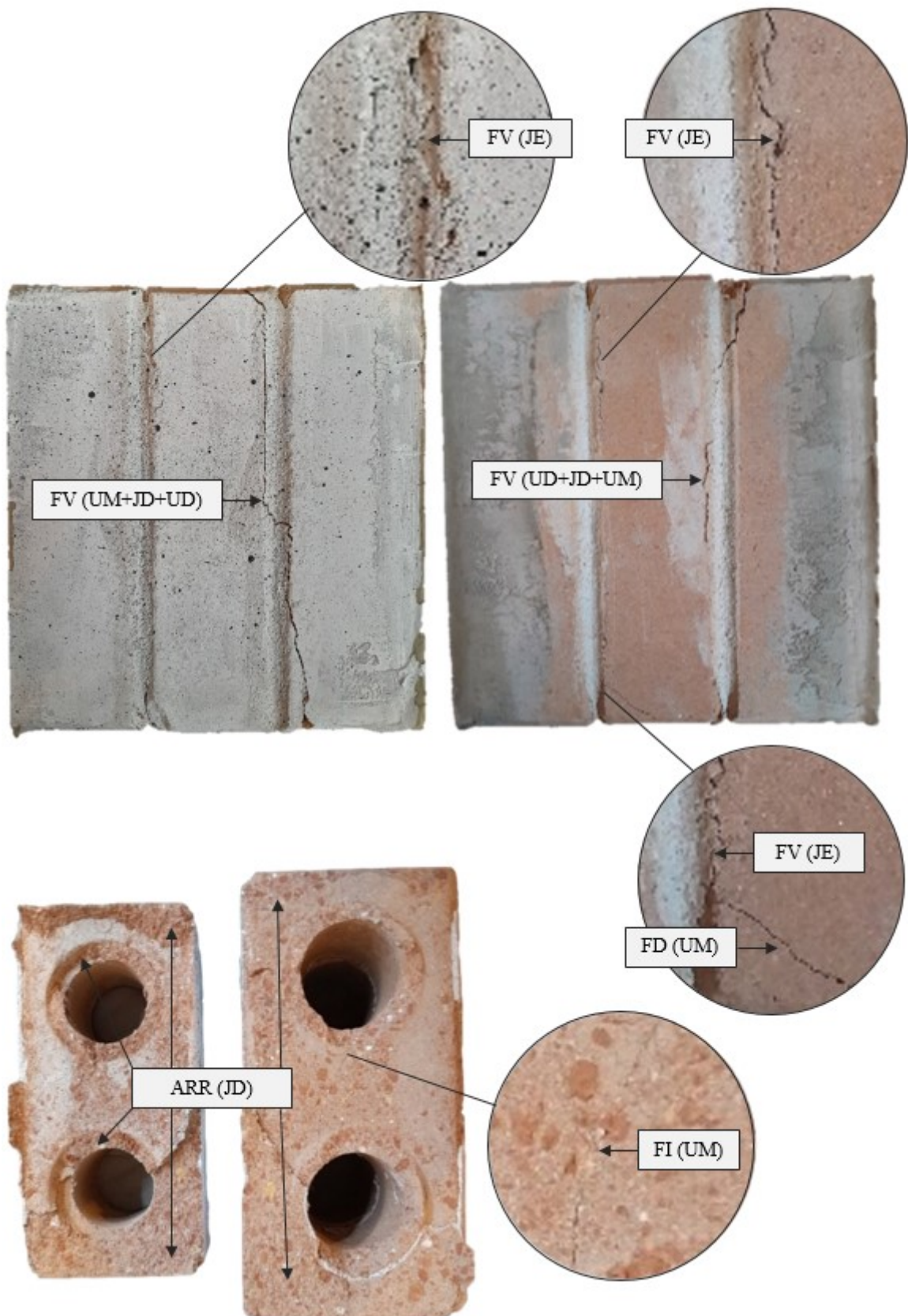
Figura C.11 – Padrões de fissuração dos prismas AP após a ruptura por cisalhamento.



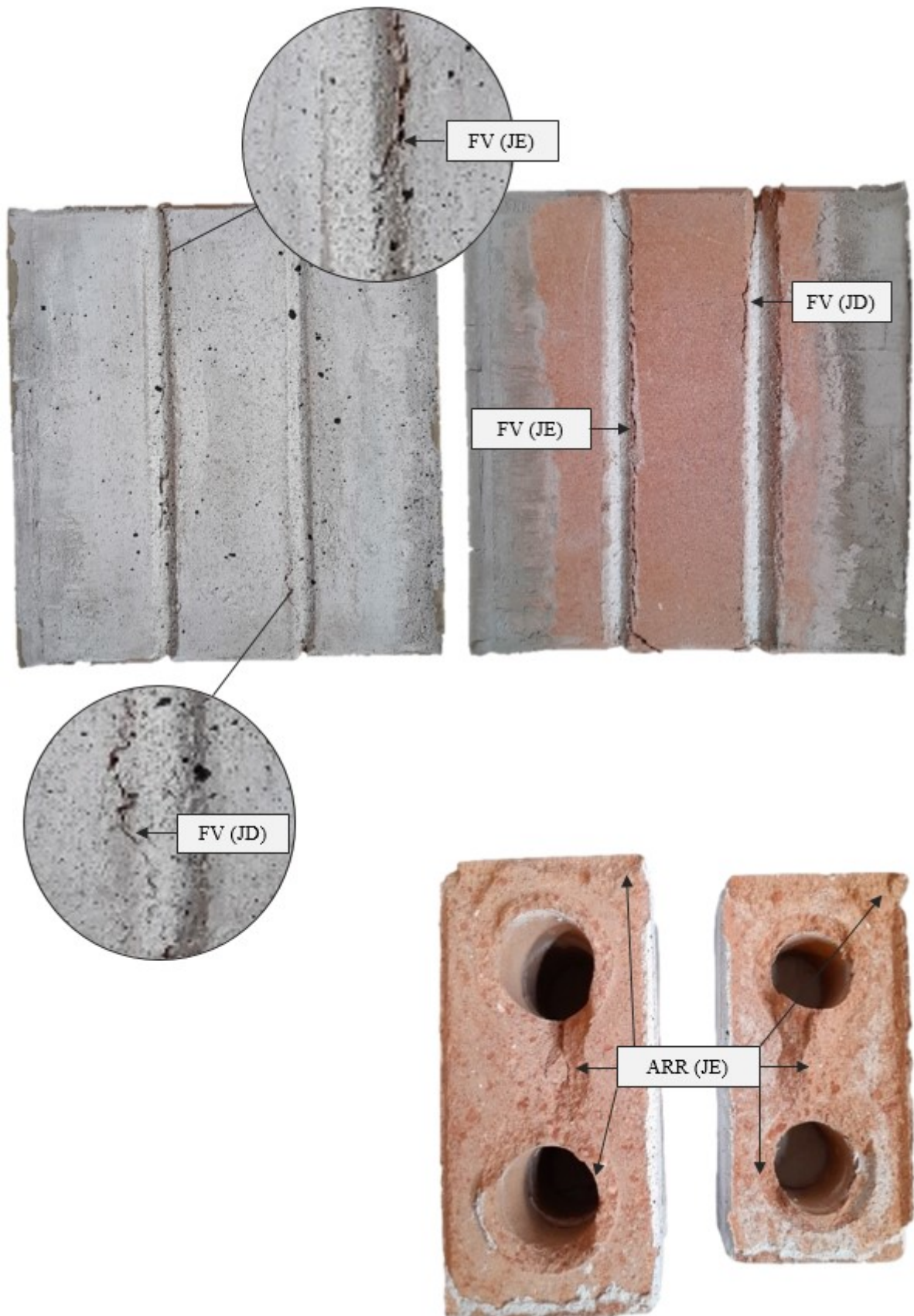
**Figura C.12** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AP1}$  ( $\sigma_c = 0,1$  MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); horizontal, FH(UE); separação e arrancamento de material nas interfaces, ARR(JE+JD).



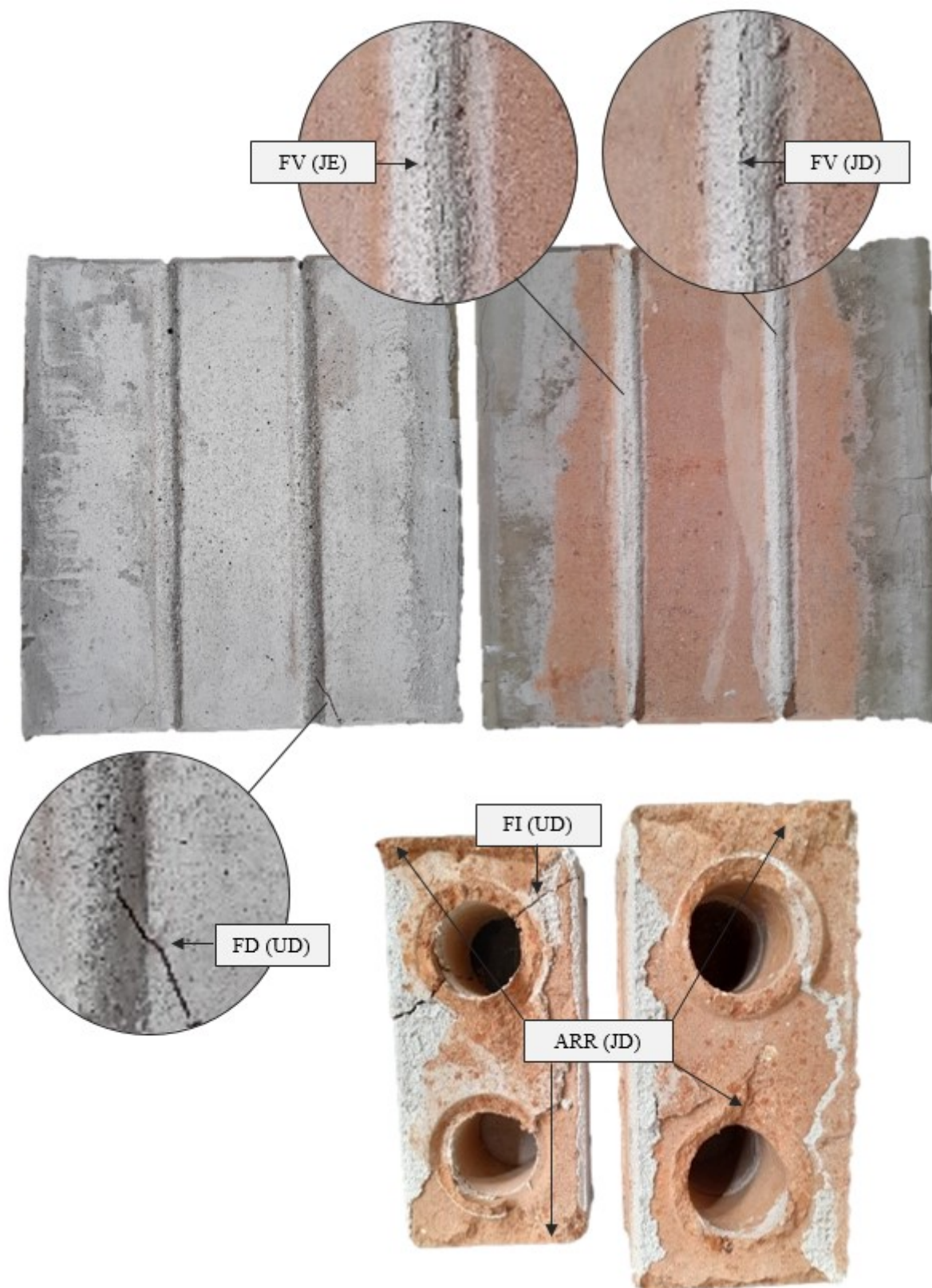
**Figura C.13** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AP2}$  ( $\sigma_c = 0,1$  MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD+UM+UD); diagonal e interna, FD+FI(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD).



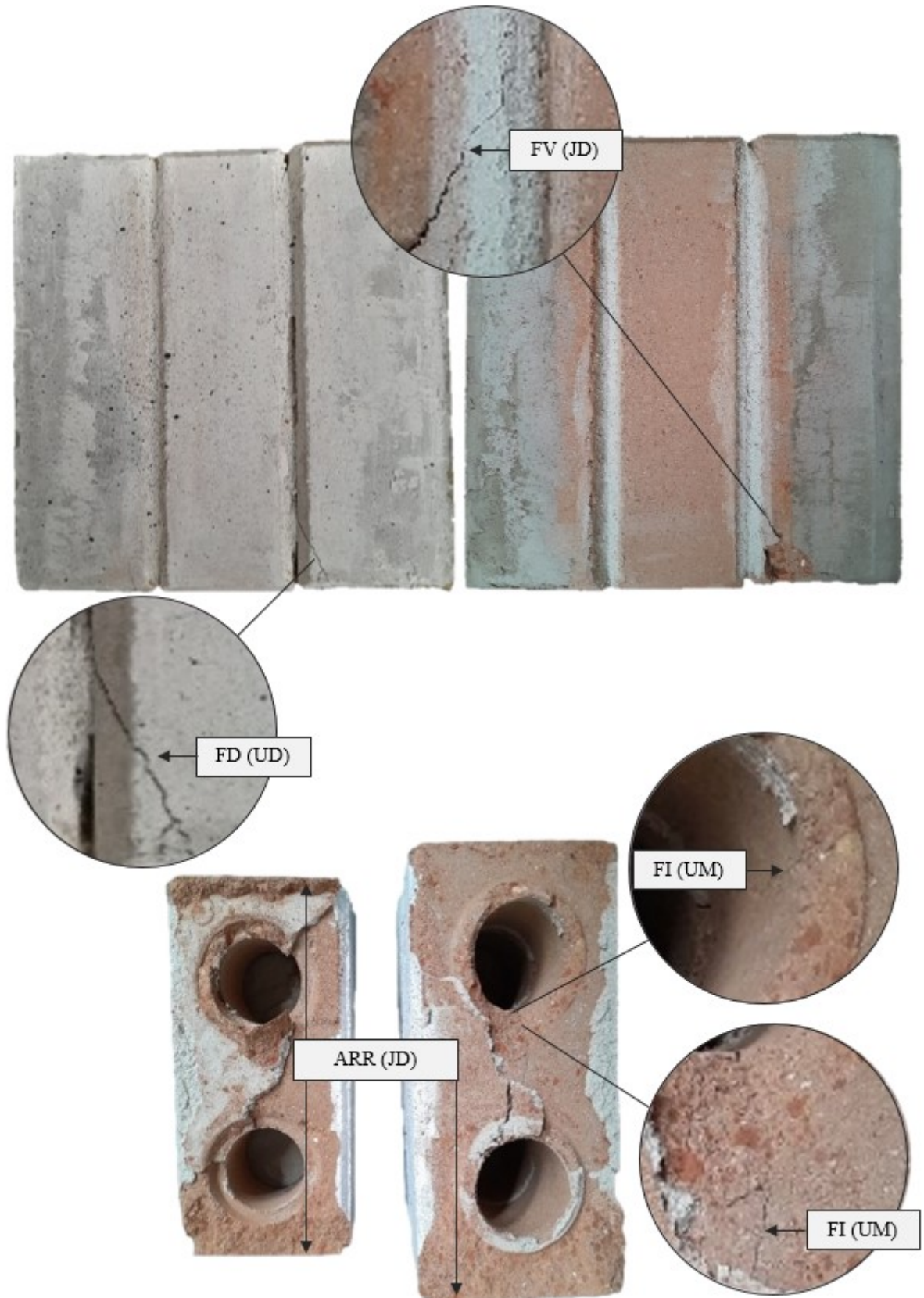
**Figura C.14** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AP3}$  ( $\sigma_c = 0,1$  MPa), evidenciando fissuras verticais, FV(JE+JD); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JE).



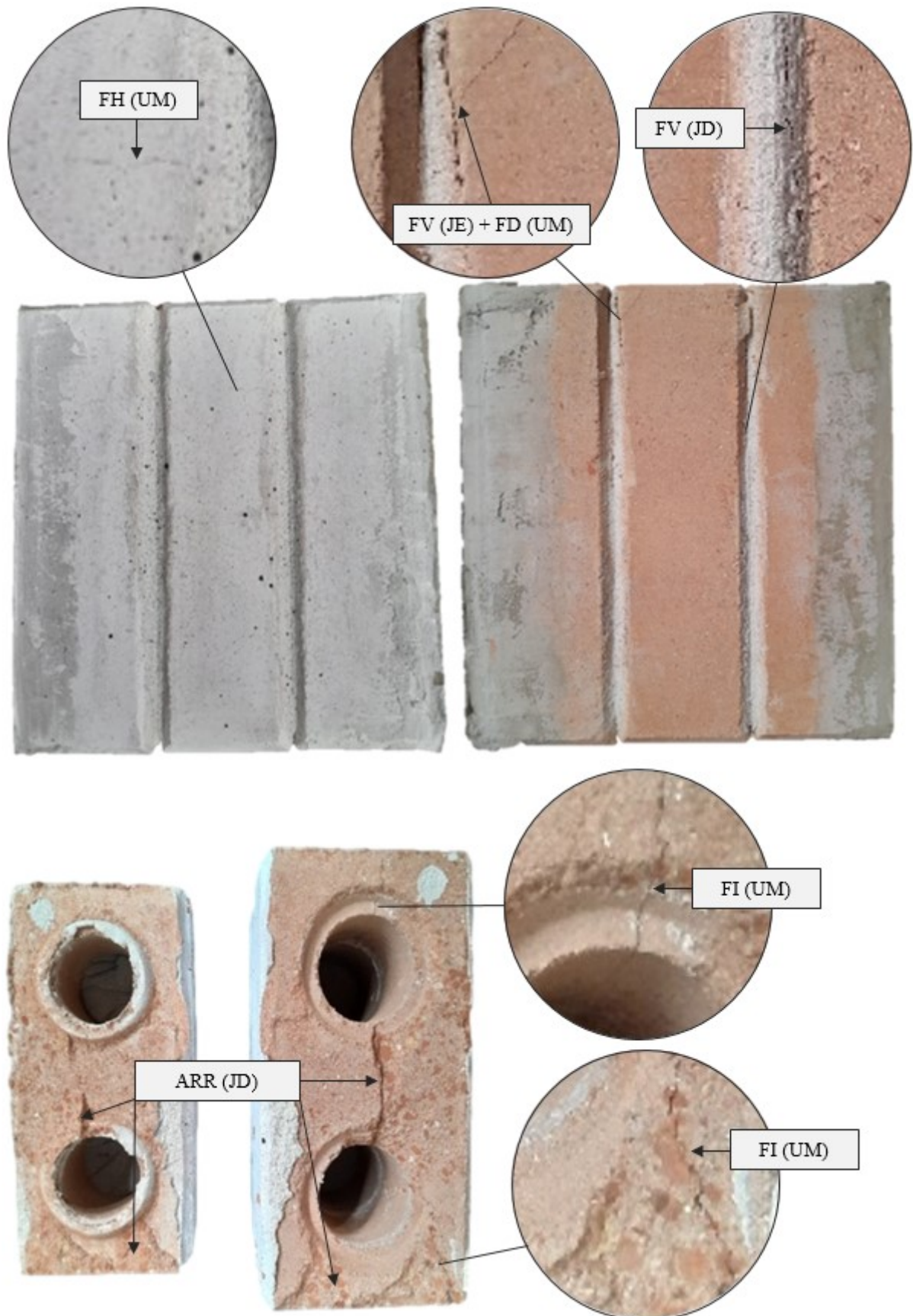
**Figura C.15** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AP4}$  ( $\sigma_c = 0,3$  MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); diagonal e interna, FD+FI(UD); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD).



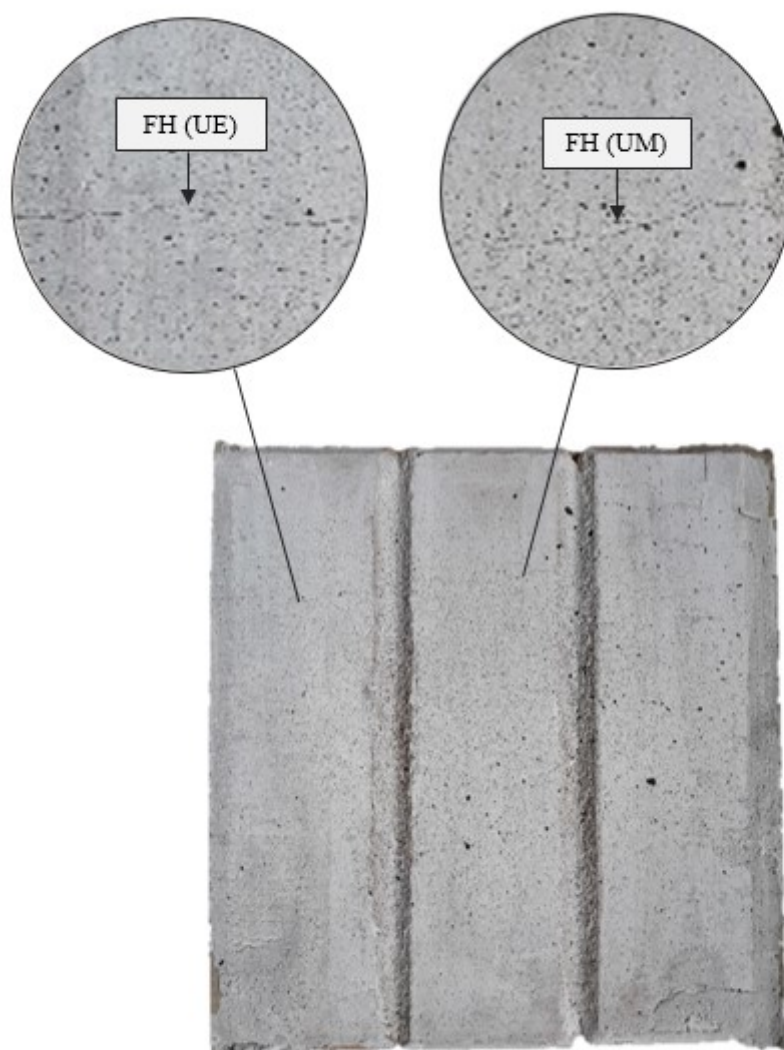
**Figura C.16** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AP5}$  ( $\sigma_c = 0,3$  MPa), evidenciando fissuras: vertical, FV(JD); diagonal FD(UD); internas, FI(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD).



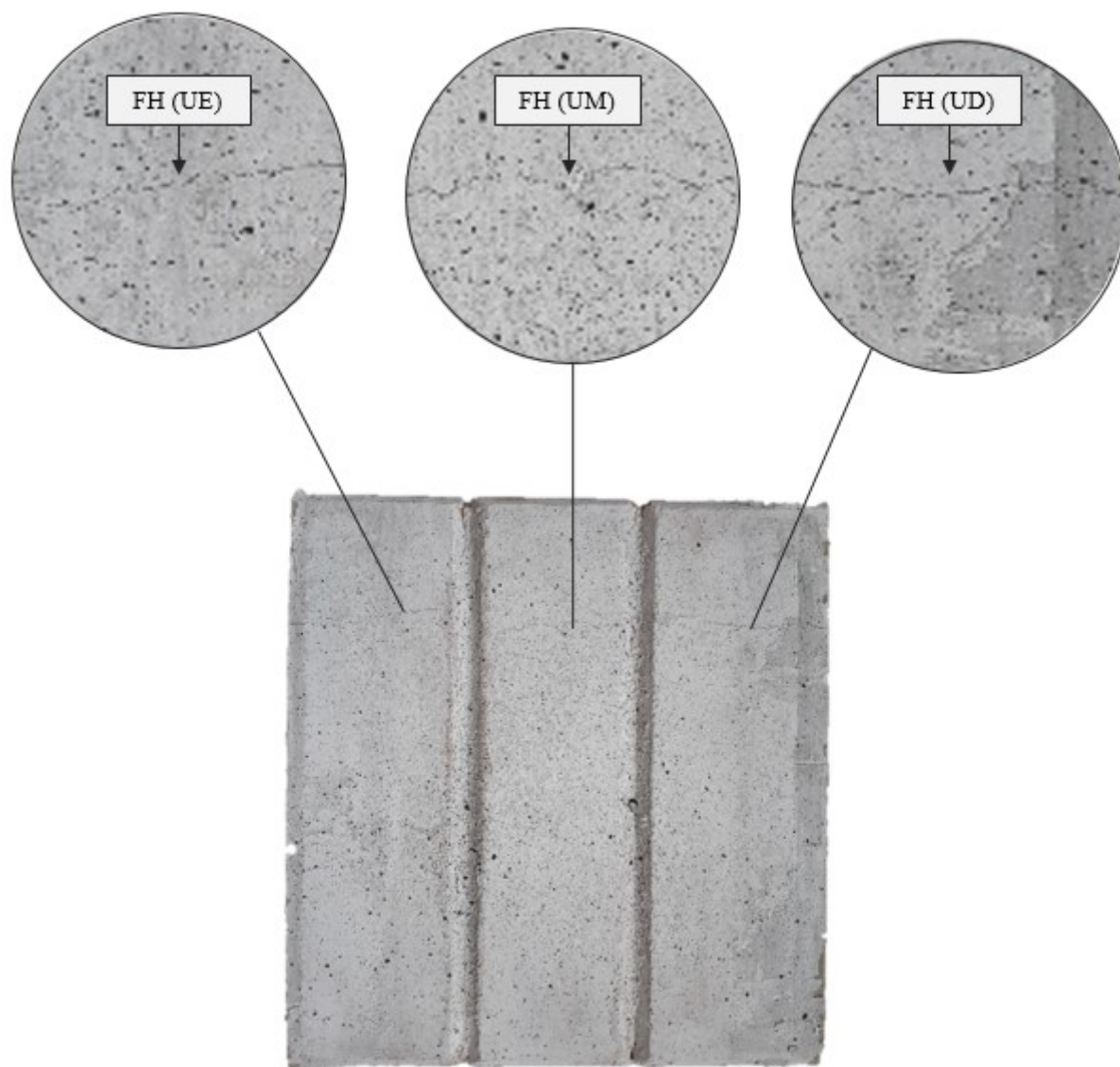
**Figura C.17** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AP6}$  ( $\sigma_c = 0,3$  MPa), evidenciando fissuras: verticais, FV(JE+JD); horizontal, diagonal e interna, FH+FD+FI(UM); separação e arrancamento de material na interface, ARR(JD).



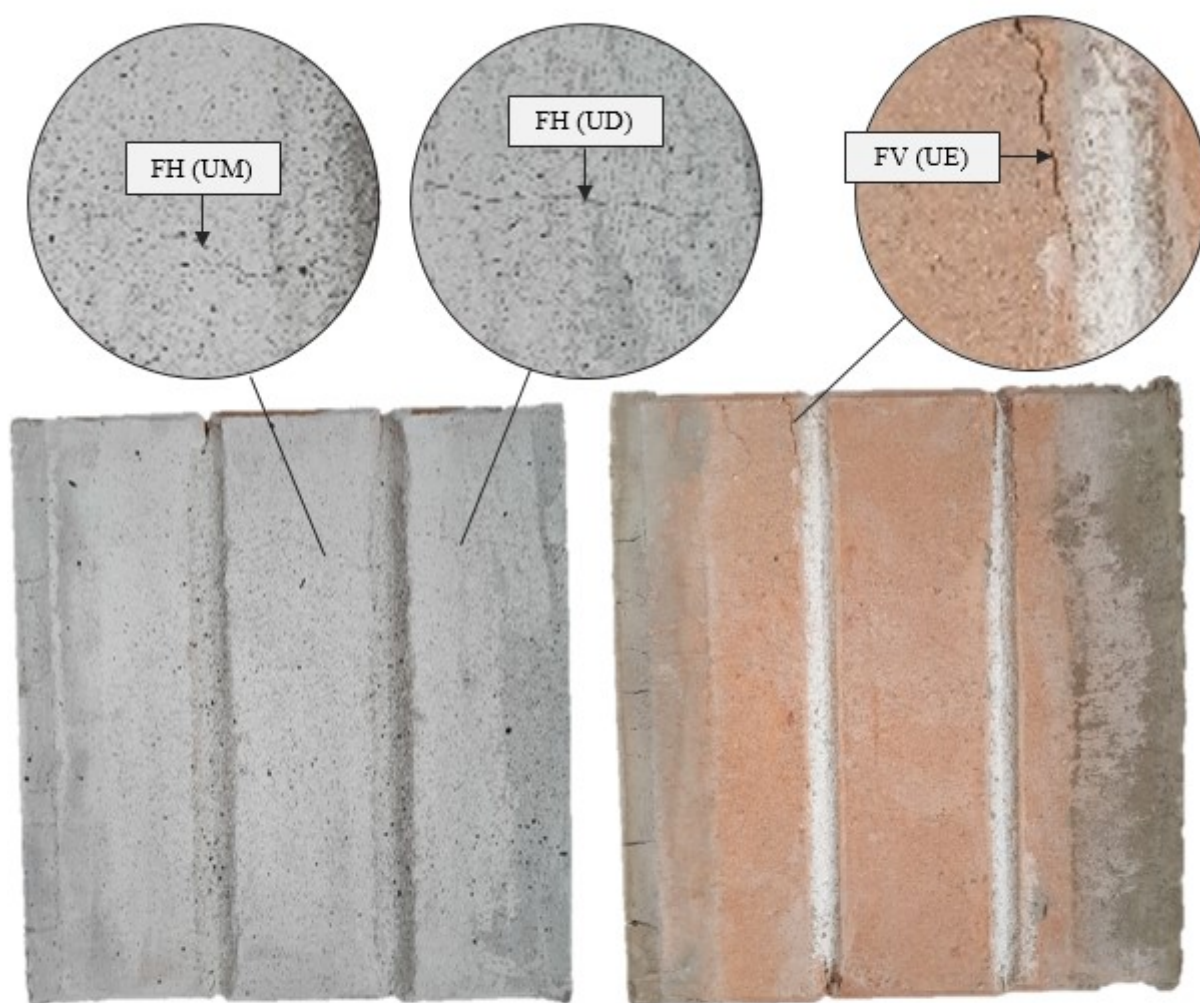
**Figura C.18** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AP7}$  ( $\sigma_c = 0,5$  MPa), evidenciando fissuras horizontais, FH(UE+UM); sem separação das unidades.



**Figura C.19** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AP8}$  ( $\sigma_c = 0,5$  MPa), evidenciando fissuras horizontais, FH(UE+UM+UD); sem separação das unidades.

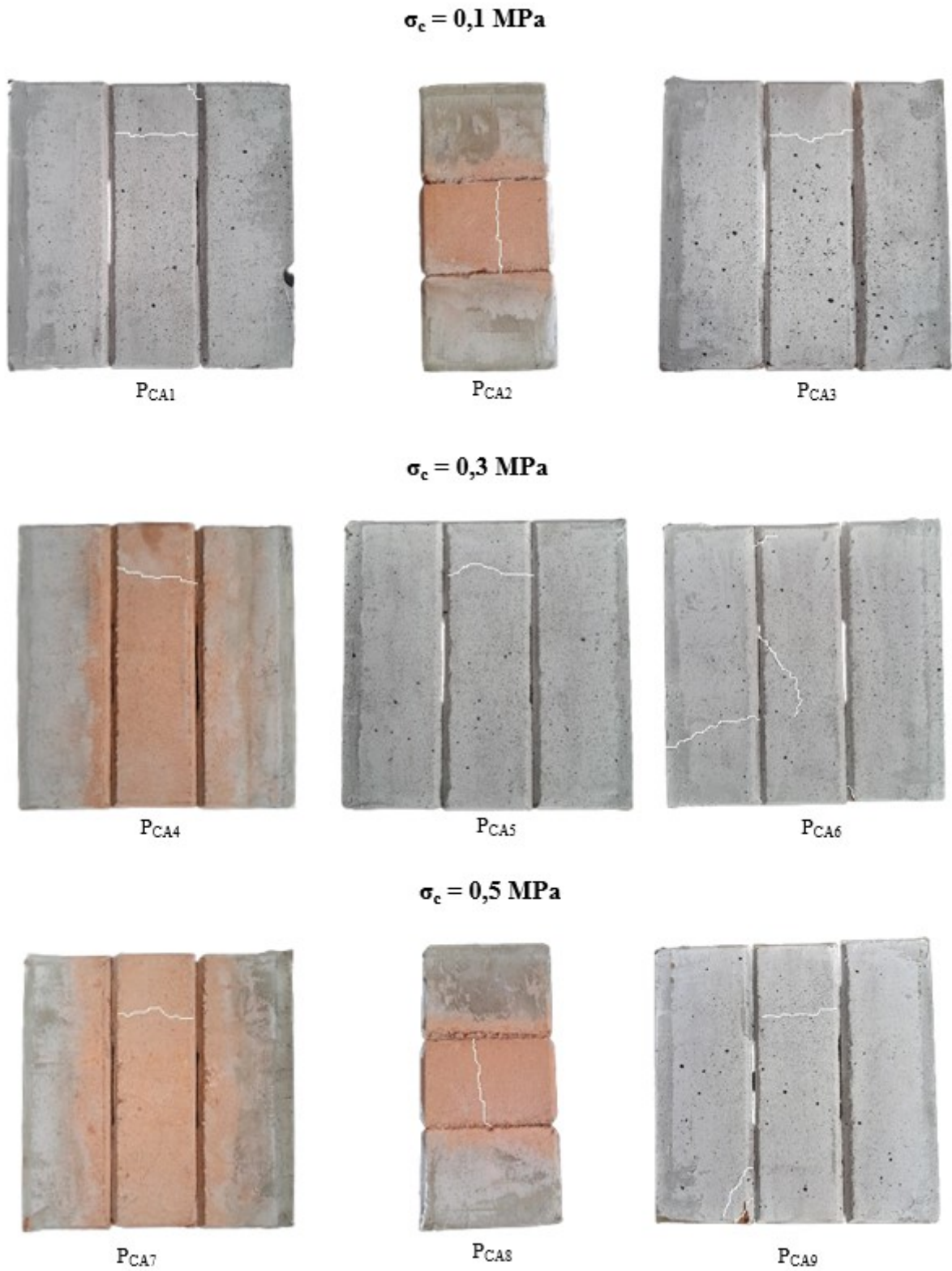


**Figura C.20** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{AP9}$  ( $\sigma_c = 0,5$  MPa), evidenciando fissuras: vertical, FV (UE); horizontais, FH(UM+UD); sem separação das unidades.

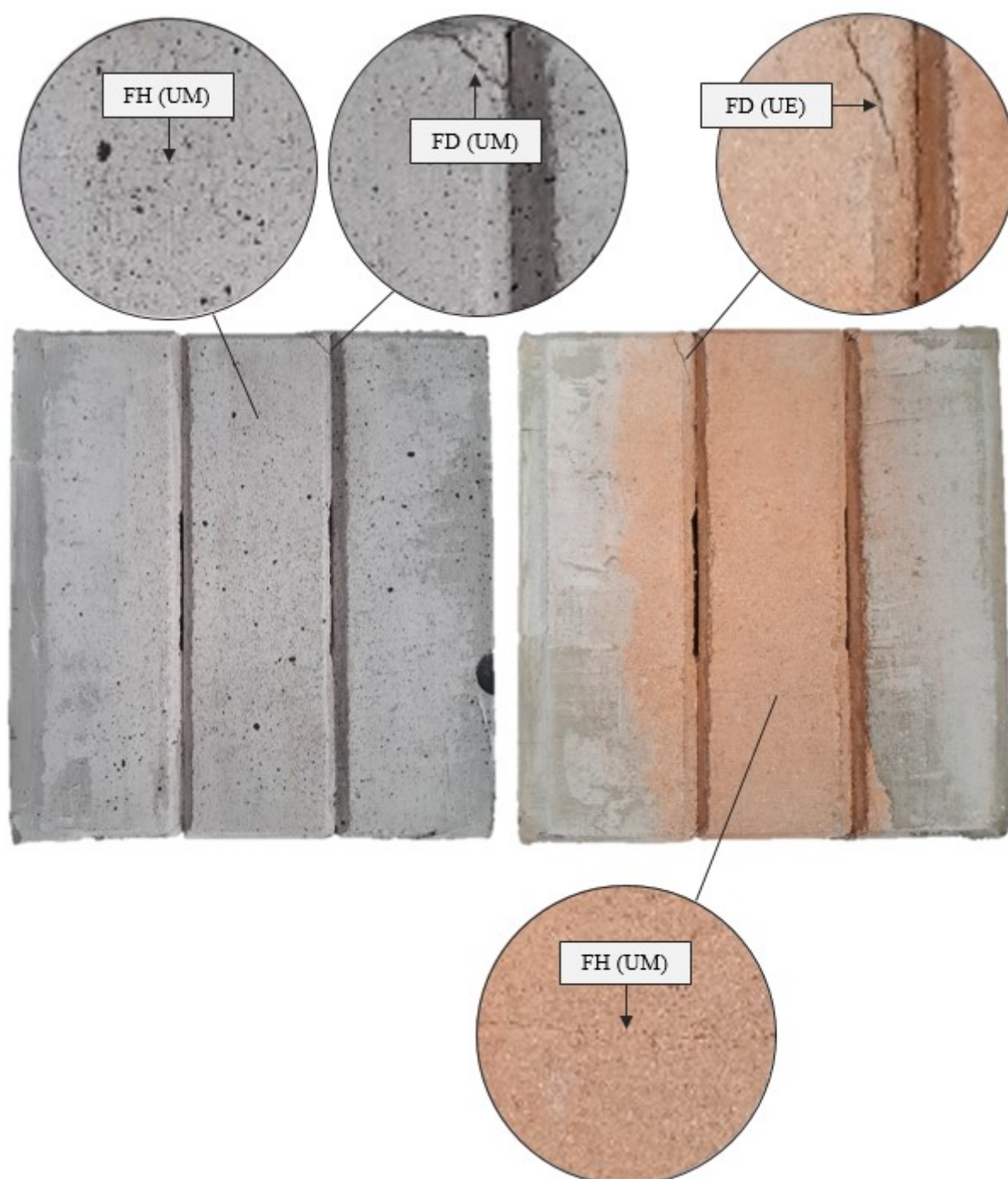


- Prismas CA

Figura C.21 – Padrões de fissuração dos prismas CA após a ruptura por cisalhamento.



**Figura C.22** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{CA1}$  ( $\sigma_c = 0,1$  MPa), evidenciando fissuras: horizontais, FH(UM); diagonais, FD(UE+UM); sem separação das unidades.



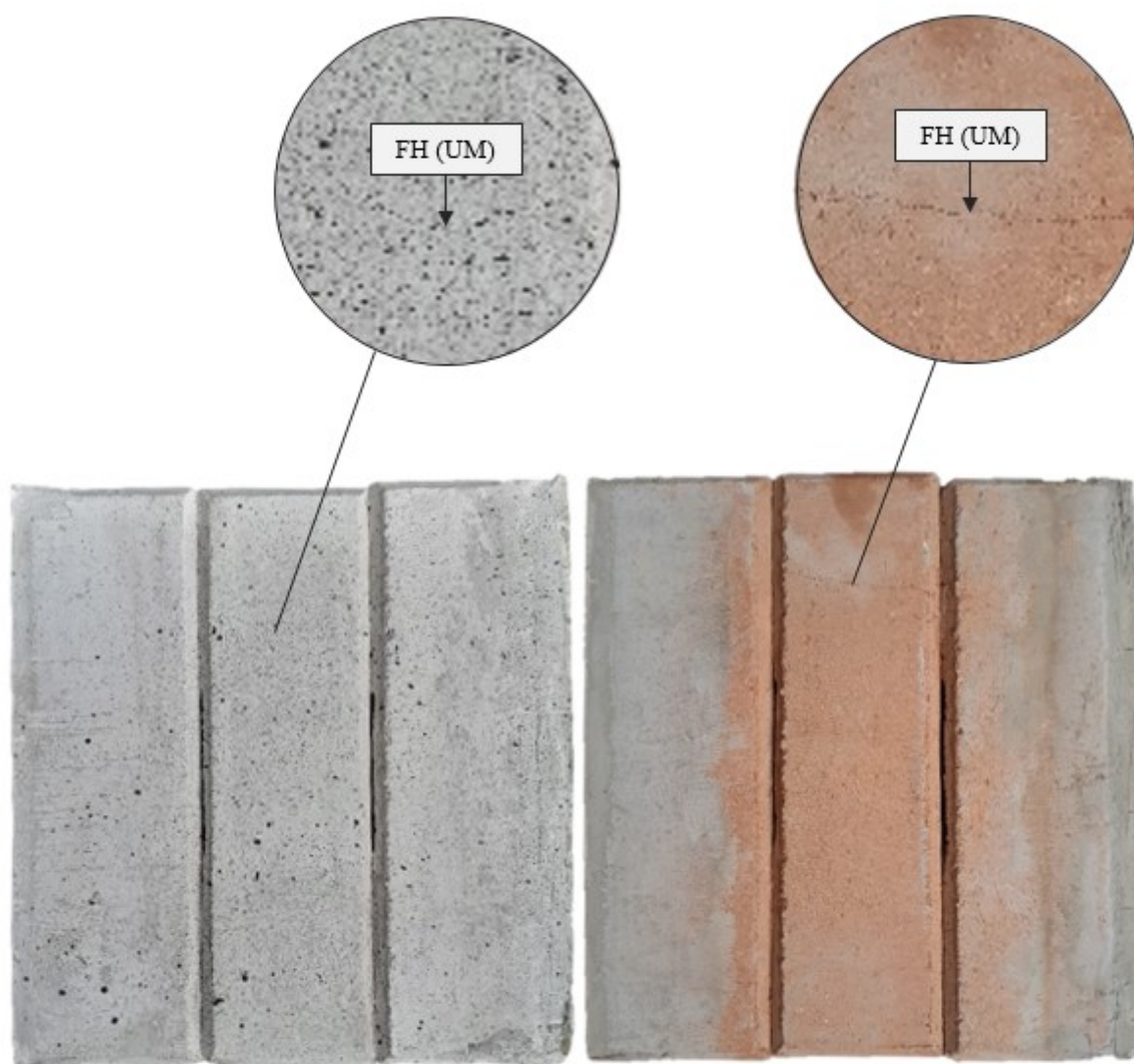
**Figura C.23** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{CA2}$  ( $\sigma_c = 0,1$  MPa), evidenciando fissuras: horizontais, FH(UM); diagonal, FD(UM); sem separação das unidades.



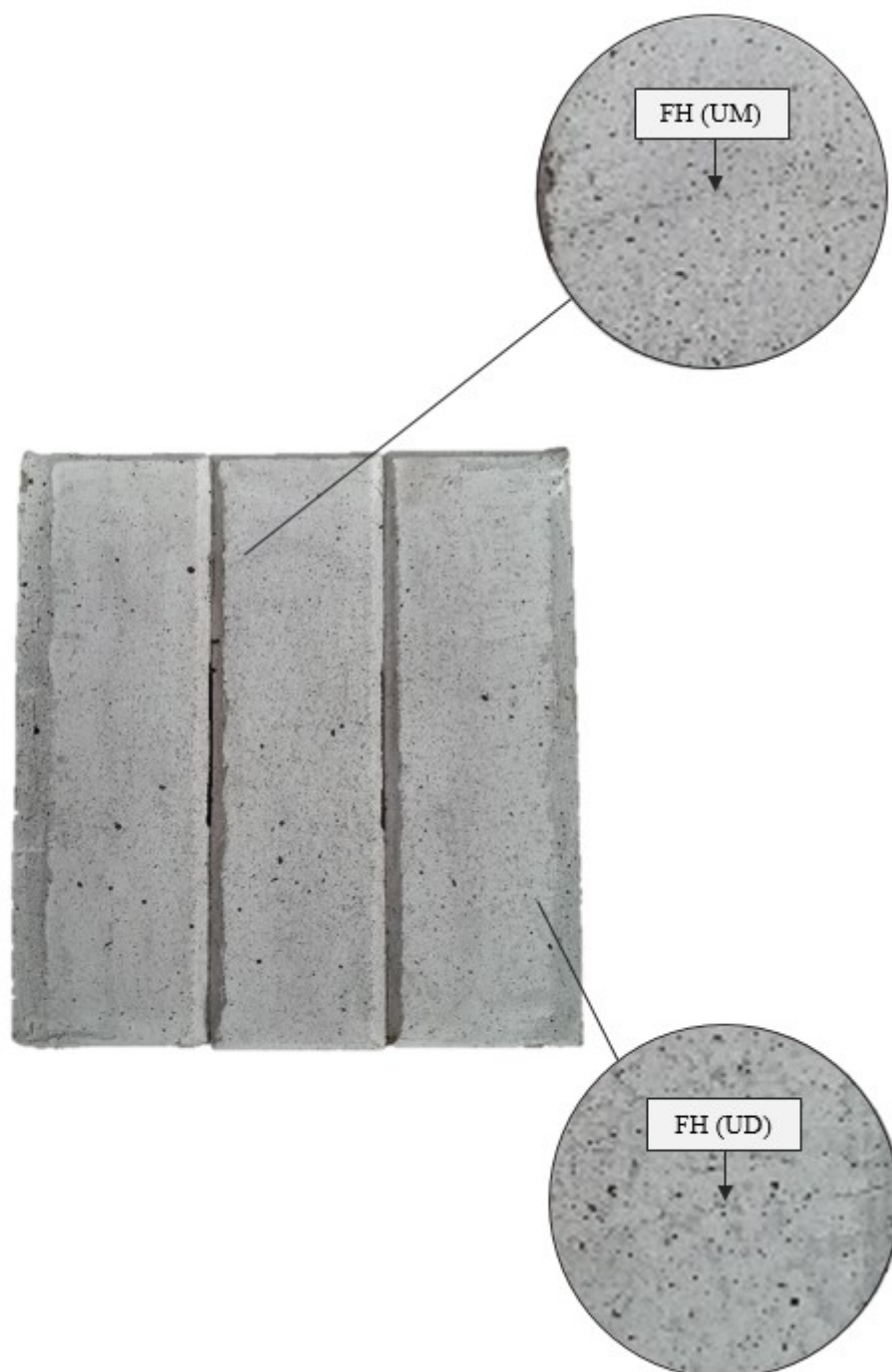
**Figura C.24** – Registro detalhado do modo de falha do prisma P<sub>CA3</sub> ( $\sigma_c = 0,1$  MPa), evidenciando fissuras horizontais, FH(UM); sem separação das unidades.



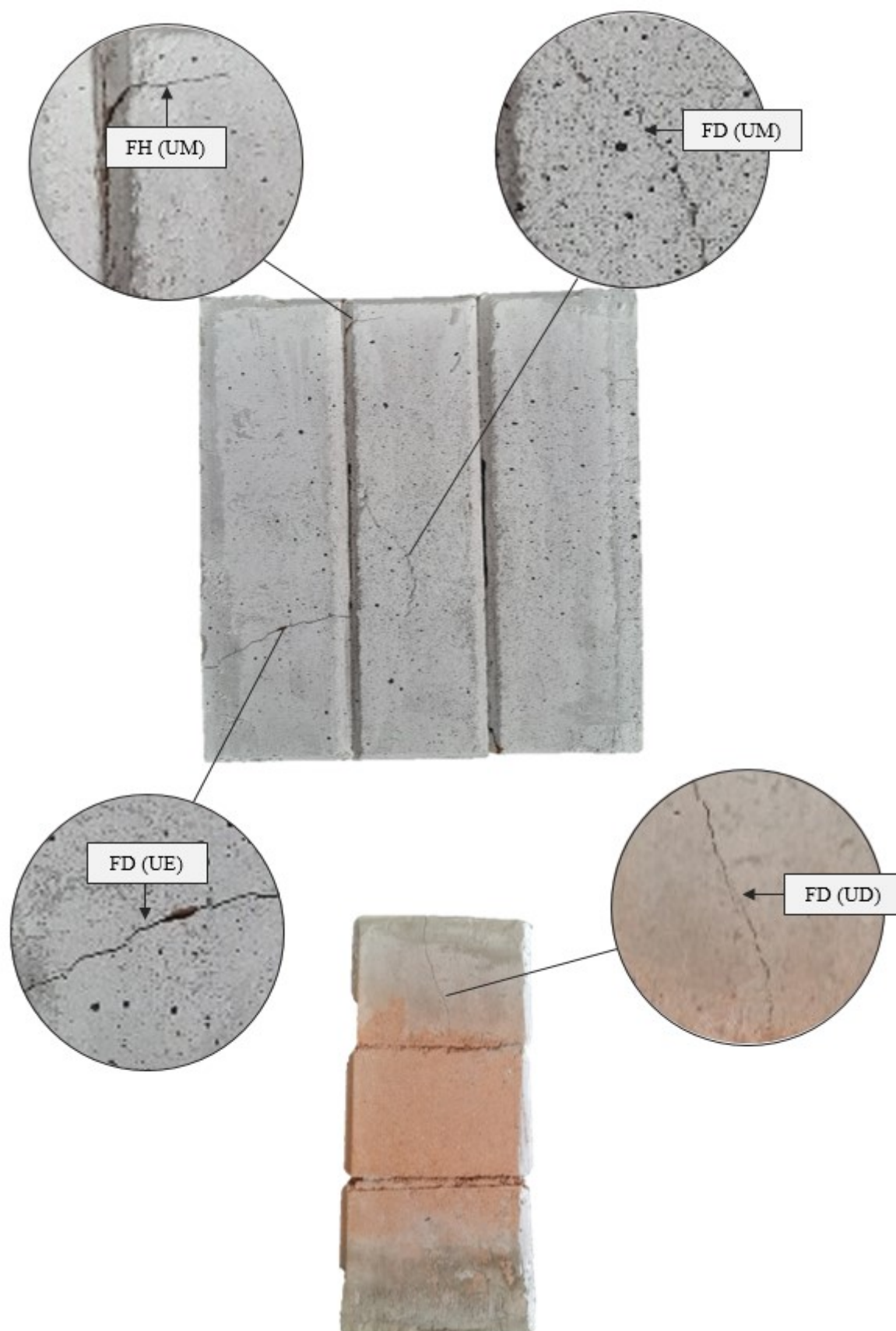
**Figura C.25** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{CA4}$  ( $\sigma_c = 0,3$  MPa), evidenciando fissuras horizontais, FH(UM); sem separação das unidades.



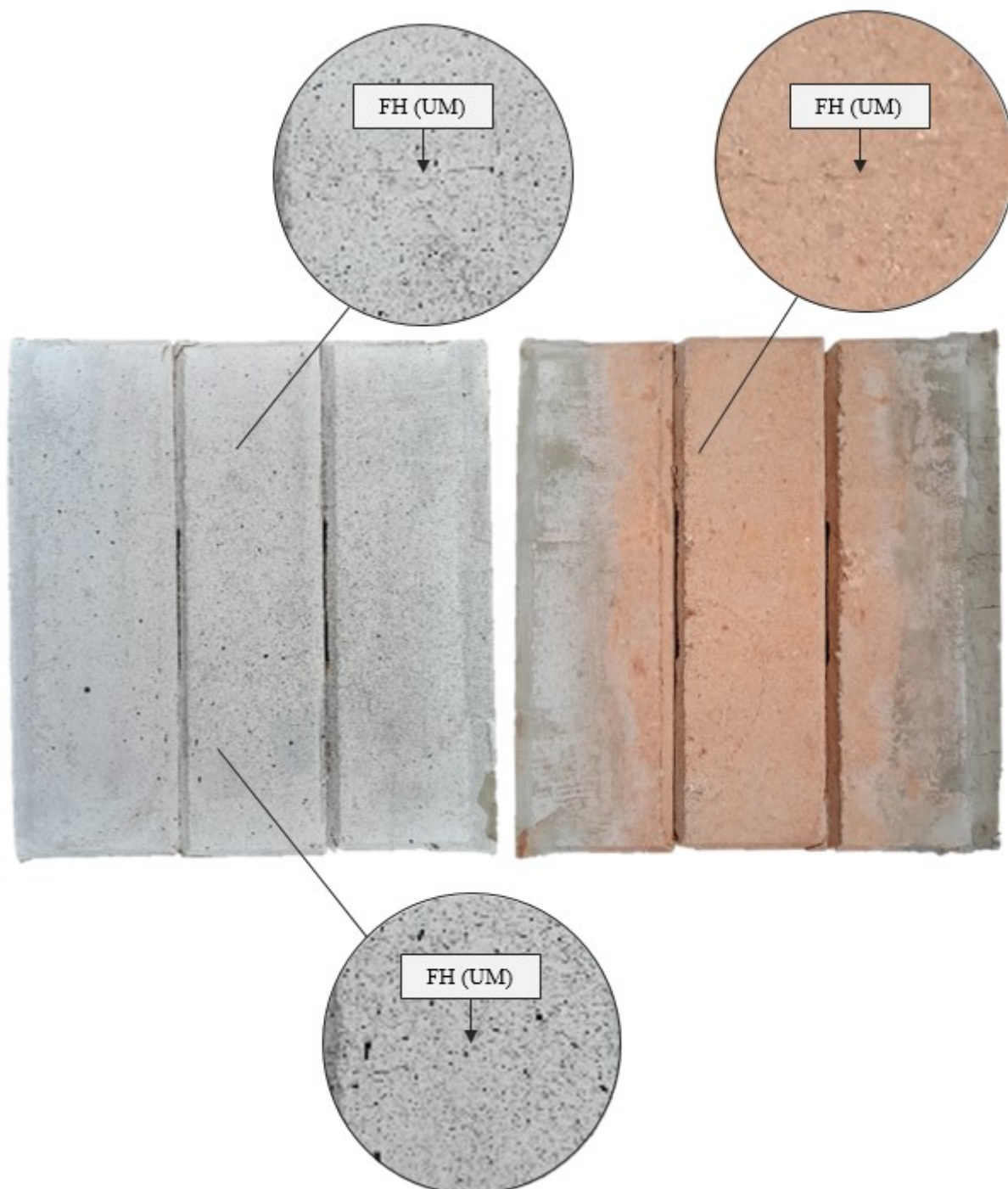
**Figura C.26** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{CA5}$  ( $\sigma_c = 0,3$  MPa), evidenciando fissuras horizontais, FH(UM+UD); sem separação das unidades.



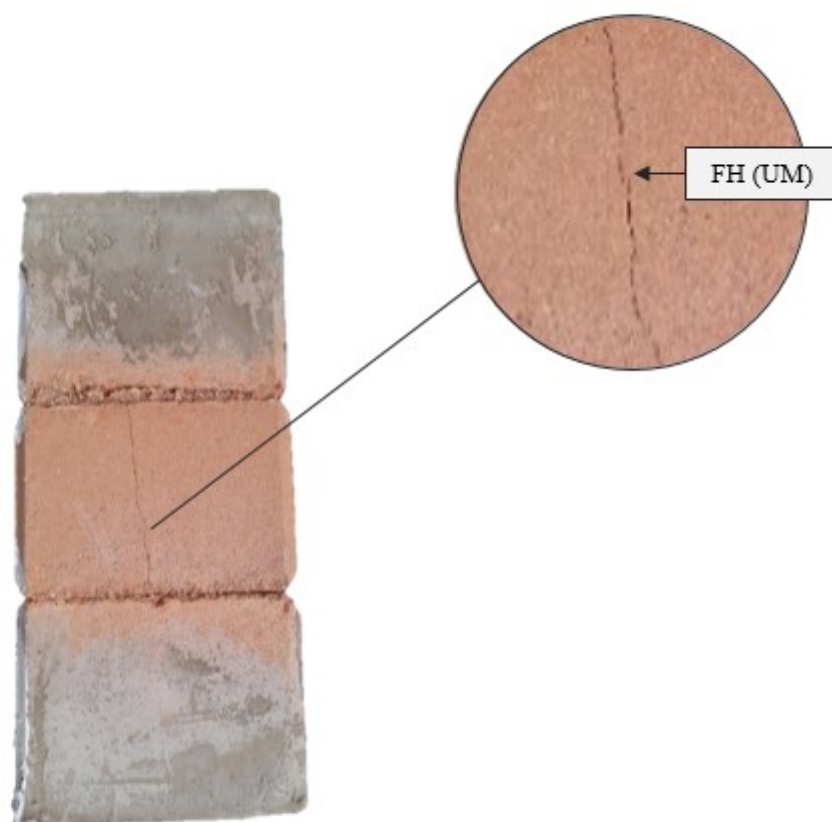
**Figura C.27** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{CA6}$  ( $\sigma_c = 0,3$  MPa), evidenciando fissuras: horizontal, FH(UM); diagonais, FD(UE+UM+UD); sem separação das unidades.



**Figura C.28** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{CA7}$  ( $\sigma_c = 0,5$  MPa), evidenciando fissuras horizontais, FH(UM); sem separação das unidades.



**Figura C.29** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{CA8}$  ( $\sigma_c = 0,5$  MPa), evidenciando fissuras: horizontal, FH(UM); sem separação das unidades.



**Figura C.30** – Registro detalhado do modo de falha do prisma  $P_{CA9}$  ( $\sigma_c = 0,5$  MPa), evidenciando fissuras: horizontal, FH(UM); diagonais, FD(UE+UM); sem separação das unidades.

