

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

RELATÓRIO PARCIAL

INICIAÇÃO CIENTÍFICA

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Mércia M. S. B. de Barros

Pesquisadora: Fernanda Belizário Silva

São Paulo, maio de 2007.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| PARTE I. RESUMO DO PLANO | 3 |
| I.1. Motivação | 3 |
| I.2. Objetivo | 3 |
| I.3. Plano de trabalho..... | 3 |
| I.4. Cronograma..... | 5 |
| PARTE II. Resumo das atividades do primeiro período – 01/06/06 a 10/11/06..... | 7 |
| PARTE III. Atividades desenvolvidas no segundo período – 11/11/06 a 10/05/07 12 | |
| III.1. Apresentação do programa experimental..... | 12 |
| III.1.1. Caracterização no estado anidro | 12 |
| III.1.2. Caracterização no estado endurecido | 13 |
| III.2. Caracterização dos ensaios de avaliação mecânica da argamassa empregados no programa experimental. | 17 |
| III.2.1. Resistência à compressão..... | 17 |
| III.2.2. Resistência à tração na flexão..... | 19 |
| III.2.3. Módulo de deformação à compressão..... | 20 |
| III.2.4. Módulo de deformação à tração na flexão..... | 22 |
| III.2.5. Módulo de deformação pelo ultrassom..... | 23 |
| III.2.6. Módulo de deformação pela frequência de ressonância | 24 |
| III.3. Apresentação e análise dos resultados da caracterização no estado anidro. 25 | |
| III.3.1. Massa específica | 25 |
| III.3.2. Granulometria..... | 26 |
| III.3.3. Resíduo insolúvel e sílica presentes na cal | 27 |
| III.4. Apresentação e análise dos resultados dos ensaios de resistência mecânica e de módulo de deformação. | 27 |
| III.4.1. Influência do formato do corpo-de-prova | 30 |
| III.4.2. Influência do tipo de ensaio para um determinado formato de corpo-de-prova | 38 |
| III.4.3. Análise da influência do traço..... | 58 |
| III.5. Considerações finais sobre o programa experimental e a análise dos resultados | 60 |

| | |
|--|-----|
| III.6. Publicação científica | 65 |
| PARTE IV. Considerações finais | 65 |
| IV.1. Quanto aos objetivos a serem atingidos | 65 |
| IV.2. Quanto às dificuldades encontradas ao longo do desenvolvimento da segunda etapa do trabalho | 66 |
| IV.3. Proposta de continuidade do trabalho | 67 |
| PARTE V. Referências bibliográficas | 71 |
| ANEXO A. Tratamento estatístico dos dados..... | 73 |
| ANEXO B. Procedimentos de ensaio e adaptações a normas..... | 80 |
| ANEXO C. Resultados da caracterização no estado anidro..... | 86 |
| ANEXO D. Resultados da caracterização no estado endurecido..... | 88 |
| ANEXO E. Análise estatística dos dados | 131 |
| ANEXO F. Scripts de ensaio | 146 |
| ANEXO G. Resumo e artigo enviados ao IBRACON | 159 |

PARTE I. RESUMO DO PLANO

I.1. Motivação

A capacidade de deformação de uma determinada argamassa é um dado essencial para avaliar sua aplicabilidade, pois expressa a capacidade do material de se deformar sem que ocorra ruptura na forma de fissuras visíveis, que possam prejudicar seu desempenho. Esta propriedade é expressa pelo módulo de deformação, que é a relação entre a tensão atuante em um corpo e a deformação produzida por essa tensão. Há diferentes métodos de ensaio para a determinação dessa propriedade, os quais fornecem resultados distintos, o que dificulta tanto a caracterização de argamassas como comparações entre estudos científicos diversos.

Buscando contribuir para que possa existir um consenso no meio técnico e científico quanto à determinação desta propriedade é que se propôs a realização da presente pesquisa, cujo escopo envolve a comparação de diferentes métodos de avaliação do módulo de elasticidade.

I.2. Objetivo

O objetivo desta pesquisa é avaliar os principais métodos de ensaio propostos para a determinação do módulo de deformação de argamassas, comparando os seus resultados e relacionando-os entre si, analisando a confiabilidade de cada um e a repetibilidade de seus resultados, bem como a facilidade ou dificuldade de realização do ensaio, de modo que se identifique aquele que melhor se adequa à avaliação desta propriedade.

I.3. Plano de trabalho

O projeto será iniciado com uma pesquisa bibliográfica do assunto, que será realizada tanto em bibliotecas como por meio de pesquisas em bases de dados disponíveis na internet e em CD-ROM. A partir deste levantamento, serão

definidas, mais precisamente, as metodologias de ensaio que deverão ser avaliadas e o número de ensaios necessário para cada método. Estão previstas, inicialmente, duas dosagens de argamassas, de modo a se avaliar a influência desta variável no resultado dos ensaios.

Um dos pontos já definidos é que as argamassas serão feitas em laboratório. Para isto, serão utilizadas as instalações dos laboratórios do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica (PCC), que dispõe de toda infra-estrutura necessária, tanto para a produção de argamassas como para realização de todos os ensaios previstos.

A fim de se obter a caracterização necessária dos materiais envolvidos na pesquisa, serão realizados os ensaios listados na Tabela I-1:

Tabela I-1 - Ensaio de caracterização dos materiais no estado anidro.

| Material | Ensaio | Norma ou procedimento |
|-----------------|-------------------|------------------------------|
| Cimento | Massa específica | Picnômetro de gás Hélio |
| | Massa unitária | NBR 7251 (ABNT; 1982) |
| Cal | Massa específica | Picnômetro de gás Hélio |
| | Massa unitária | NBR 7251 (ABNT; 1982) |
| | Resíduo insolúvel | NM - 15, 2004 |
| Areia | Granulometria | NBR 7217 (ABNT, 1987) |
| | Massa específica | Picnômetro de gás Hélio |
| | Massa unitária | NBR 7251 (ABNT; 1982) |

Será também realizada a caracterização da argamassa no ensaio fresco, de acordo com os seguintes ensaios:

- Ensaio de consistência pelo “*dropping ball*”, segundo a BS 4551 (BSI, 1980);
- Densidade de massa aparente, segundo a NBR 13278 (ABNT, 2005).

Para a caracterização no estado endurecido, será realizado o ensaio de densidade de massa aparente, segundo a NBR 13280 (ABNT, 1980).

Além disso, a resistência mecânica e o módulo de deformação serão avaliados segundo a metodologia proposta na Tabela I-2. Os corpos de prova serão ensaiados somente em uma idade (28 dias), pois não é objetivo do trabalho avaliar a evolução do módulo, e sim avaliar os métodos de medição.

Tabela I-2 - Proposta de ensaios com os respectivos formatos de corpo de prova para a realização do programa experimental.

| Traço | Forma e Dimensões (cm) | Ensaio de caracterização no estado endurecido | Referências Normativas | Quantidade de corpos de prova por argamassa |
|----------------------|------------------------|--|---------------------------------------|---|
| Forte e Fraco | Placa (20x7,5x1,5) | Resistência à tração na flexão | Bastos (2001) | 20 |
| | | Módulo de deformação à tração na flexão | | |
| | | Módulo de deformação pelo ultrassom | | |
| | Cubo (10x10x10) | Resistência à compressão | BS 4551 (1980) | 40 |
| | | Módulo de deformação à compressão estático com duas formas de obtenção da medida | | |
| | | Módulo de deformação pelo ultrassom | adaptação da BS 1881 parte 203 (1986) | |
| | Prisma (4x4x16) | Resistência à tração na flexão | NBR 13279 (2005) | 20 |
| | | Resistência à compressão | NBR 13279 (2005) | |
| | | Módulo de deformação à compressão estático com uma forma de obtenção da medida | adaptação da NBR 7190 (1997) | |
| | | Módulo de deformação pelo ultrassom | adaptação da BS 1881 parte 203 (1986) | |
| | Barra (2,5x2,5x28,5) | Módulo de deformação pelo ultrassom | adaptação da BS 1881 parte 203 (1986) | 20 |
| | | Módulo de deformação pela frequência de ressonância | BS, 1990; AFNOR, 1975 | |

I.4. Cronograma

O cronograma de execução do trabalho, previsto no projeto inicial de pesquisa, encontra-se especificado a seguir:

| ITEM | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| Levantamento e análise da bibliografia | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | |
| Obtenção e caracterização dos materiais | | | | ■ | | | | | | | | |
| Moldagem dos corpos de prova | | | | | ■ | ■ | ■ | | | | | |
| Realização dos ensaios | | | | | | ■ | ■ | ■ | | | | |
| Análise dos resultados | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | |
| Elaboração dos relatórios parcial e final | | | | | | ■ | | | | | | ■ |

É importante ressaltar que algumas alterações, tanto em relação ao programa de ensaios como ao cronograma de atividades, foram feitas ao longo do desenvolvimento da pesquisa. Estas alterações estão explicitadas no primeiro relatório parcial, particularmente nos itens 2.2 (definição da composição e dosagem das argamassas) e 2.3 (métodos de ensaio).

PARTE II. Resumo das atividades do primeiro período – 01/06/06 a 10/11/06

Durante o primeiro período de desenvolvimento do trabalho, destaca-se a realização de uma extensa revisão bibliográfica, pela qual a pesquisadora buscou um maior entendimento sobre o material (argamassa) e a propriedade (módulo de deformação) a serem estudados. Conceituou-se a argamassa como material de construção, estudando-se seus empregos e propriedades mais importantes, focando no módulo de deformação. Acerca desta propriedade, após sua conceituação, foram discutidos os fatores que nela influenciam e descreveu-se cada um dos módulos de deformação usualmente avaliados e seus respectivos métodos de determinação.

Também nesta etapa da pesquisa, por meio de doações, foram obtidos os materiais necessários, quais sejam:

- Cimento Votoran CPII-E-32, doado pela Votorantim;
- Cal hidratada Supercal CH-I, doada pela Cobrascal;
- Areia quartzosa de rio (rosada), doada pela Engemix.

Os traços definidos, em volume, para a realização da pesquisa, são os apresentados na Tabela II-1. O traço “T1” é considerado forte e o “T2” fraco, distinção necessária para se verificar o poder de diferenciação dos vários métodos de ensaio de módulo de deformação.

Tabela II-1 - Conversão dos traços em volume para traços em massa.

| | | cimento | cal | areia |
|----|-----------------|----------------|------------|--------------|
| T1 | Em volume úmido | 1,0 | 0,5 | 4,5 |
| | Em massa seca | 1,0 | 0,2 | 3,8 |
| T2 | Em volume úmido | 1,0 | 2,0 | 9,0 |
| | Em massa seca | 1,0 | 0,8 | 7,6 |

Foram necessárias duas moldagens para cada traço, sendo uma delas específica para a produção dos corpos-de-prova cúbicos, pois havia uma limitação da capacidade do misturador horizontal. Durante as primeiras moldagens de cada traço, definiu-se o teor de água por meio do ensaio de *dropping-ball*, estabelecido pela BS 4551 (BSI, 1980), tendo em vista um índice

de penetração de 10 ± 1 mm. As composições resultantes estão apresentadas na Tabela II-2.

Tabela II-2 - Composição dos traços utilizados.

| | cimento (kg) | cal (kg) | areia (kg) | água (l) |
|----------|---------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| Traço T1 | 9,2 | 1,93 | 35,0 | 8,5 |
| Traço T2 | 4,6 | 3,78 | 35,0 | 9,1 |

Foi redefinido também o plano de ensaios para a caracterização da argamassa no estado endurecido. Reduziu-se o número de corpos-de-prova em formato de placa, pela limitação da quantidade de fôrmas. Já a capacidade do misturador limitou a quantidade de corpos-de-prova cúbicos. Incluiu-se o cilindro como formato de corpo-de-prova, pois seus métodos estão bem estabelecidos e há várias referências bibliográficas que possibilitam comparação de valores. O novo planejamento encontra-se na Tabela II-3.

Tabela II-3 - Planejamento e procedimentos para caracterização das argamassas no estado endurecido.

| Traço | Forma e dimensões (cm) | Ensaio de caracterização no estado endurecido | Referências normativas | Número de corpos de prova por traço |
|-----------------------------------|--|--|---|-------------------------------------|
| 1:0,5:4,5 (forte) e 1:2:9 (fraco) | Placa (20x7,5x1,5) | Resistência à tração na flexão | Bastos (2001) | 8 |
| | | Módulo de deformação à tração na flexão | | |
| | | Módulo de deformação pelo ultrassom | adaptação da BS EN 12504 (2004) (ver anexo "A") | |
| | Cubo (10x10x10) | Resistência à compressão | BS 4551 (1980) | 20 |
| | | Módulo de deformação à compressão estático com duas formas de obtenção da medida | adaptação da NBR 7190 (1997) (ver anexo "A") | |
| | | Módulo de deformação pelo ultrassom | adaptação da BS EN 12504 (2004) (ver anexo "A") | |
| | Prisma (4x4x16) | Resistência à tração na flexão | NBR 13279 (2005) | 20 |
| | | Resistência à compressão | NBR 13279 (2005) | |
| | | Módulo de deformação à compressão estático com uma forma de obtenção da medida | adaptação da NBR 7190 (1997) (ver anexo "A") | |
| | | Módulo de deformação pelo ultrassom | adaptação da BS EN 12504 (2004) (ver anexo "A") | |
| | Barra (2,5x2,5x28,5) | Módulo de deformação pelo ultrassom | adaptação da BS EN 12504 (2004) (ver anexo "A") | 20 |
| | | Módulo de deformação pela frequência de ressonância | BS 1881:209 (1990); NF B 10-511 (1975) | |
| Cilindro (5x10) | Resistência à compressão | NBR 7215 | 20 | |
| | Módulo de deformação à compressão estático com uma forma de obtenção da medida | adaptação da NBR 7190 (1997) (ver anexo "A") | | |
| | Módulo de deformação pelo ultrassom | adaptação da BS EN 12504 (2004) (ver anexo "A") | | |

Como não havia sido realizada parte dos ensaios de caracterização no estado anidro (por não serem necessários para a realização das moldagens) e todas as caracterizações no estado endurecido (pois não havia transcorrido 28 dias da data das moldagens), estabeleceu-se um cronograma para realização destes ensaios, que se apresenta na Tabela II-4.

Tabela II-4 - Programação dos ensaios a serem realizados na segunda etapa do projeto.

| Data | Ensaio a serem realizados | Formato dos corpos de prova/traço | Data de moldagem |
|-----------------|---|--|-------------------------|
| 17/nov | Caracterização no estado endurecido (treinamento) | Cubos/ T1 | 20/out |
| 23/nov | Caracterização no estado endurecido | Cubos/ T1 | 26/out |
| 24/nov | Caracterização no estado endurecido (treinamento) | Prismas, barras, cilindros e placas/ T1 | 27/out |
| 30/nov 1/dez | Restante da caracterização no estado anidro | - | - |
| 4/dez | Caracterização no estado endurecido | Prismas, barras, cilindros e placas/ T1 | 6/nov |
| 7/dez | Caracterização no estado endurecido | Cubos/ T2 | 9/nov |
| 8/dez | Caracterização no estado endurecido | Prismas, barras, cilindros e placas/ T2 | 10/nov |

Na Tabela II-5, apresenta-se os resultados dos ensaios de massa unitária, realizado de acordo com adaptação da NBR 7251 (ABNT, 1982). Os valores obtidos se apresentaram semelhantes aos obtidos por pesquisadores em outros trabalhos.

Tabela II-5 - Resultados de massa unitária para os materiais empregados.

| Material | massa unitária (kg/dm³) |
|-----------------|---|
| Areia seca | 1,51 |
| Cal | 0,52 |
| Cimento | 1,26 |

Realizou-se também parte do ensaio de determinação do coeficiente de inchamento, seguindo-se algumas disposições da NBR 6467 (ABNT, 2006), para que se tivesse uma idéia do estado de umidade em que se encontrava a areia utilizada na pesquisa quando encaminhada à obra. A curva de inchamento resultante está ilustrada pela Figura II-1.

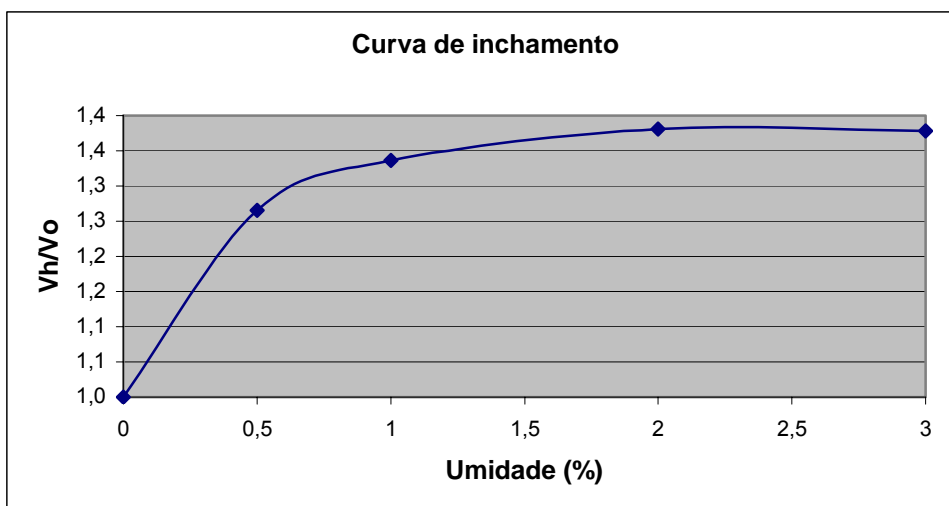


Figura II-1- Curva de inchamento da areia empregada no programa experimental.

Na Tabela II-6, são apresentados os resultados do ensaio de *dropping-ball*, descrito pela BS 4551 (BSI, 1980), e do ensaio de densidade de massa aparente, segundo a NBR 13278 (ABNT, 2005). A caracterização no estado fresco foi realizada no momento da moldagem dos corpos-de-prova.

Tabela II-6 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas T1 e T2 no estado fresco.

| | Traço T1 | Traço T2 |
|--------------------------------|----------|----------|
| Índice de penetração (mm) | 10,8 | 9,0 |
| Densidade (g/cm ³) | 2,1 | 2,0 |

O cronograma de trabalho inicialmente proposto foi revisto e se apresenta a seguir.

| ATIVIDADE | nov 06 | dez 06 | jan 07 | fev 07 | mar 07 | abr 07 | mai 07 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Complementação da revisão bibliográfica | | | | | | | |
| Caracterização dos materiais | | | | | | | |
| Moldagem dos corpos de prova | | | | | | | |
| Realização dos ensaios | | | | | | | |
| Análise dos resultados | | | | | | | |
| Elaboração do relatório final | | | | | | | |

PARTE III. Atividades desenvolvidas no segundo período – 11/11/06 a 10/05/07

III.1. Apresentação do programa experimental

A seguir, será apresentado o programa experimental realizado nesta etapa da pesquisa, que compreende as caracterizações no estado anidro e no estado endurecido.

III.1.1. Caracterização no estado anidro

Os ensaios realizados são apresentados Tabela III-1.

Tabela III-1 - Ensaio de caracterização dos materiais no estado anidro.

| Propriedade | Material | Referência normativa |
|--------------------|-----------------|----------------------------------|
| Massa específica | Cimento | Procedimento descrito no ANEXO C |
| | Cal | |
| | Areia | |
| Granulometria | Areia | NBR NM 248 (ABNT, 2003). |
| Resíduo insolúvel | Cal | NBR 6473 (ABNT, 2003). |

A realização dos ensaios de massa específica e granulometria se deu no dia 01/02/2007, enquanto o ensaio de resíduo insolúvel foi feito no dia 16/03/2007.

A mudança ocorrida no que diz respeito à norma inicialmente definida para o ensaio de análise granulométrica corresponde somente a uma atualização da norma NBR 7217 (ABNT, 1987). No caso do ensaio de determinação do resíduo insolúvel, este foi realizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), que adota a NBR 6473 (ABNT, 2003).

Nota-se uma incongruência entre a data de realização dos ensaios e aquela que consta no cronograma do último relatório parcial (48ª semana do ano de 2006). A justificativa para isto é a coincidência da data anteriormente prevista com as provas finais da Escola Politécnica, motivo pelo qual a pesquisadora foi

obrigada a adiar os ensaios para janeiro, uma vez que não iria prejudicar a finalização do trabalho. Além disso, para o ensaio de determinação do resíduo insolúvel, se fez necessário um agendamento no IPT, o que levou ao atraso em sua realização.

III.1.2. Caracterização no estado endurecido

Os ensaios realizados e as normas empregadas encontram-se listados na Tabela III-2. Além da caracterização mecânica, foi realizado, conjuntamente, o ensaio de determinação da densidade de massa aparente, conforme a NBR 13280 (ABNT, 1980). Os “*scripts*” de ensaio, empregados na prensa de marca EMIC, encontram-se no ANEXO F. O procedimento para medição dos corpos-de-prova encontra-se descrito no ANEXO B.

Tabela III-2 - Ensaios de caracterização mecânica das argamassas no estado endurecido.

| Traço | Forma e dimensões (cm) | Ensaios de caracterização no estado endurecido | Referências normativas | Quantidade de CPS por ensaio (T1/T2) | Quantidade de corpos de prova por argamassa (T1/T2) |
|---|-------------------------|---|--|--------------------------------------|---|
| 1:0,5: 4,5 (forte) e 1:2:9 (fraco) | Placa (20x7,5x1,5) | Resistência à tração na flexão | Bastos (2001) (ANEXO B) | 3/3 | 8/8 |
| | | Módulo de deformação à tração na flexão | | 5/5 | |
| | | Módulo de deformação pelo ultrassom (2 direções - ao longo do comprimento e da espessura) | Procedimento descrito no ANEXO B. | 8/8 | |
| | Cubo (10x10x10) | Resistência à compressão | adaptação da BS EN 1015-11 (1999) | 3/5 | 23/21 |
| | | Módulo de deformação à compressão estático com duas formas de obtenção da medida (extensômetro e relógios comparadores) | adaptação da BS EN 1015-11 (1999) e da NBR 8522 (2003) (ANEXO B) | 10/10 | |
| | | Módulo de deformação pelo ultrassom | Procedimento descrito no ANEXO B. | 23/18 | |
| | Prisma (4x4x16) | Resistência à tração na flexão | BS EN 1015-11 (1999) | 8/8 | 21/21 |
| | | Resistência à compressão | BS EN 1015-11 (1999) | 4/5 | |
| | | Módulo de deformação à compressão estático com uma forma de obtenção da medida (extensômetro) | adaptação da BS EN 1015-11 (1999) e da NBR 8522 (2003) (ANEXO B) | 12/11 | |
| | | Módulo de deformação pelo ultrassom (2 direções - ao longo do comprimento e da espessura) | Procedimento descrito no ANEXO B. | 21/21 | |
| | Barra (2,5x2,5x28,5) | Módulo de deformação pelo ultrassom | Procedimento descrito no ANEXO B. | 20/3 | 20/3 |
| | | Módulo de deformação pela frequência de ressonância | NF B 10-511 (1975) | 20/3 | |
| | Cilindro (5x10) | Resistência à compressão | adaptação da BS EN 1015-11 (1999) | 4/4 | 20/20 |
| | | Módulo de deformação à compressão estático com uma forma de obtenção da medida (extensômetro) | adaptação da BS EN 1015-11 (1999) e da NBR 8522 (2003) (ANEXO B) | 10/10 | |
| | | Módulo de deformação pelo ultrassom | Procedimento descrito no ANEXO B. | 20/20 | |

As seguintes modificações relativas às referências normativas foram feitas:

- Como não foi possível a aquisição da BS EN 12504 (BSI, 2004), foi estabelecido um procedimento para a realização do ensaio, com base na norma precedente BS 1881: Part 203 (BSI, 1986), disponível no laboratório. Este procedimento encontra-se sintetizado no ANEXO B;
- Decidiu-se basear todos os ensaios de resistência à compressão na norma BS EN 1015-11 (BSI, 1999), para que se uniformizasse o nível de tensão aplicado nos variados corpos-de-prova, de modo a se estabelecerem comparações mais consistentes entre os resultados (as adaptações encontram-se descritas no ANEXO B). Esta norma também foi adotada para o ensaio de resistência à tração na flexão do prisma;

pois, com base na experiência de outros pesquisadores da EPUSP com o ensaio, verificou-se que a velocidade de carga desta norma fornece resultados mais consistentes;

- Para o ensaio de módulo de deformação à compressão, foram consideradas as velocidades de carregamento propostas pela BS EN 1015-11 (BSI, 1999), para que se compatibilizasse este ensaio com o de resistência à compressão, tendo em vista que o valor de resistência à compressão deve ser levado em conta para o estabelecimento do limite de carregamento para o ensaio de módulo. No entanto, a maneira como se aplica este carregamento baseou-se na NBR 8522 (ABNT, 2003), por ser uma postura adotada anteriormente e com sucesso por outros pesquisadores da EPUSP. O resultado desta combinação de métodos gerou um procedimento que se encontra no ANEXO B;
- Para o ensaio de módulo de deformação pela frequência de ressonância, a norma francesa NF B 10-511 (AFNOR, 1975) oferecia subsídios suficientes para a realização do ensaio, não sendo necessário considerar a BS 1881: Part 209 (BSI, 1990).

Nota-se que o número de corpos-de-prova previsto para cada formato de corpo-de-prova não foi modificado desde o último relatório. Somente no caso da barra do traço fraco (T2), embora tenham sido moldados 20 corpos-de-prova, só foi possível utilizar três deles, pois o restante apresentou ruptura por retração elevada. Além disso, outra mudança notável refere-se à determinação do módulo de deformação pelo ultrassom: para a placa e para o prisma, decidiu-se medir o módulo em duas direções, de modo a verificar se há alguma diferença entre ambos os valores. Embora não esteja apresentado na Tabela III-2, estabeleceu-se também que o ensaio de ultrassom, para o prisma e para o cilindro, deveria ser feito por dois operadores distintos, para que se pudesse comparar os resultados posteriormente. Foram testados também dois métodos de posicionamento das barras no ensaio de frequência de ressonância.

Na Tabela III-3, estão listadas as datas de realização de cada um dos ensaios de caracterização no estado endurecido, assim como as idades em que cada amostra foi ensaiada.

Tabela III-3 - Cronograma de execução dos ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido.

| Data | Ensaio | Formato de corpo-de-prova | Data de moldagem | Idade no ensaio (dias) |
|-----------|---|-------------------------------|------------------|------------------------|
| 8/1/2007 | Medição e pesagem | Todos | - | - |
| 9/1/2007 | Módulo de deformação pelo ultrassom | Todos | - | ~ 63 |
| 10/1/2007 | Teste dos scripts | Corpos-de-prova de sacrifício | - | - |
| 11/1/2007 | Resistência à compressão | Cubo (T2) | 9/11/2006 | 63 |
| | Módulo de deformação à compressão | Cilindro (T1) | 6/11/2006 | 66 |
| 12/1/2007 | Resistência à compressão | Cilindro (T2) | 10/11/2006 | 63 |
| | Módulo de deformação à compressão | | | |
| | Resistência à tração na flexão | Prisma (T1) | 6/11/2006 | 67 |
| | Resistência à compressão | | | |
| | Módulo de deformação à compressão | | | |
| 15/1/2007 | Resistência à tração na flexão | Prisma (T2) | 10/11/2006 | 66 |
| | Resistência à compressão | | | |
| | Módulo de deformação à compressão | | | |
| 16/1/2007 | Resistência à tração na flexão | Placa (T1) | 6/11/2006 | 71 |
| | Módulo de deformação à tração na flexão | Placa (T2) | 10/11/2006 | 67 |
| 6/2/2007 | Módulo de deformação pela frequência de ressonância | Barra (T1) | 06/11/2006 | 92 |
| | | Barra (T2) | 10/11/2006 | 88 |
| 15/2/2007 | Resistência à compressão | Cubo (T1) | 8/12/2006 | 69 |
| | Módulo de deformação pelo ultrassom | | | |
| | Módulo de deformação à compressão | | | |

É possível notar uma grande diferença entre as datas propostas anteriormente para a realização destes ensaios (PARTE II) e o cronograma efetivamente praticado. No entanto, em dezembro de 2006, ainda havia dúvidas em relação aos procedimentos e “*scripts*” de ensaio, de modo que, para primeiramente se esclarecer as dúvidas existentes, decidiu-se ensaiar os corpos-de-prova aos 63 dias, e não mais aos 28.

Ainda assim, percebe-se que o prazo de 63 dias não foi seguido rigorosamente. No momento de realização dos ensaios, notou-se que não era possível ensaiar, no mesmo dia, todos os corpos-de-prova moldados na mesma ocasião (prismas, barras, cilindros e placas). Sendo assim, houve alguns poucos dias de atraso no ensaio destes corpos-de-prova, que, no entanto, não devem exercer influência sobre os resultados, pois após 63 dias o material já se encontra bastante estável, conforme observado por Jones (1967), para o concreto, na Figura III-1. Para argamassas, o comportamento esperado é similar.

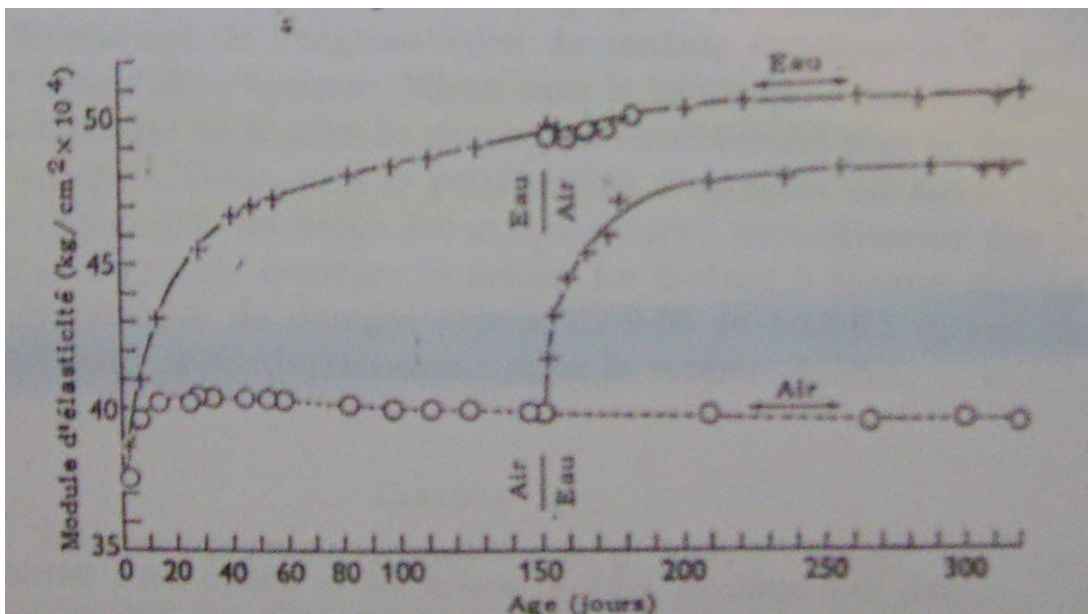


Figura III-1 - Evolução do módulo de deformação do concreto com a idade do corpo-de-prova, em dias. São avaliados corpos-de-prova imersos em água (eau), secos ao ar (air) e imersos em água somente após 150 dias (eau/air) (JONES, 1967).

No caso da placa, houve o problema de que era necessário agendar o ensaio em outro laboratório, motivo pelo qual houve um atraso maior. Já no caso da barra, foi necessário um tempo mais longo para se compreender o funcionamento do equipamento de ensaio de frequência de ressonância, ainda não dominado por nenhum dos técnicos do laboratório, o que justifica o seu adiamento.

III.2. Caracterização dos ensaios de avaliação mecânica da argamassa empregados no programa experimental.

Neste item do relatório, as condições de execução dos ensaios de caracterização mecânica são registradas por meio de fotos, destacando-se, para cada um deles, os detalhes relevantes para a sua correta realização.

III.2.1. Resistência à compressão

A avaliação da resistência à compressão de todos os corpos de prova, exceto o cubo do traço T1, foi realizada na prensa EMIC disponível no Laboratório de Revestimentos do Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP (Figura III-2). No que diz respeito ao cubo (T1), tentou-se, primeiramente,

ensaiá-lo na EMIC. Entretanto, atingido o limite de carga da prensa, o corpo-de-prova ainda não havia rompido. A partir desta observação, decidiu-se ensaiar este formato de corpo-de-prova no IPT, que possui uma prensa com maior capacidade de carga.



Figura III-2- Prensa EMIC.

Para o ensaio do IPT, a velocidade de carregamento foi de 60kgf/s (e não de 650N/s como na EMIC – vide ANEXO B), velocidade não muito distinta da especificada pela BS EN 1015-11 (BSI, 1999) e para a qual a prensa já se encontrava calibrada. Além disso, romperam-se também corpos-de-prova cilíndricos (traço T1) no IPT, para averiguar se há alguma diferença entre os resultados obtidos pelas duas prensas distintas.

O ensaio é ilustrado pela Figura III-3.



Figura III-3 - Ensaio de resistência à compressão em corpo-de-prova prismático.

III.2.2. Resistência à tração na flexão

Os corpos-de-prova prismáticos foram ensaiados na EMIC, enquanto os em forma de placa, que requerem um controle mais preciso da velocidade de aplicação de deslocamento, foram ensaiados na prensa INSTRON, situada no Laboratório de Microestrutura do Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, sendo este, inclusive, o equipamento utilizado por Bastos (autor do procedimento adotado neste trabalho) em seus ensaios.

No caso do prisma, optou-se por adotar a velocidade mais baixa de aplicação do carregamento fornecida pela BS EN 1015-11 (BSI, 1999), de 13N/s. No caso da placa, as informações sobre o ensaio estão apresentadas no ANEXO B.

Não foi necessário nenhum preparo prévio para os corpos-de-prova prismáticos. No que diz respeito à placa, para que a carga fosse aplicada na face mais regular, a face de moldagem ficou em contato com os apoios e, como apresentava certa irregularidade superficial, o corpo-de-prova teve de ser lixado, de modo que ficasse mais estável em seu posicionamento.

O ensaio dos corpos-de-prova prismáticos está representado pela Figura III-4, enquanto o das placas encontra-se na Figura III-5.



Figura III-4 - Ensaio de resistência à tração na flexão do corpo-de-prova prismático (EMIC). (As linhas contínuas que aparecem no corpo de prova referem-se à posição em que os extensômetros serão acoplados durante o ensaio do módulo de deformação)



Figura III-5 - Ensaio de resistência à tração na flexão do corpo-de-prova em forma de placa (INSTRON).

III.2.3. Módulo de deformação à compressão

Neste ensaio os cuidados foram concentrados principalmente nos dispositivos de medida de deformação (ou deslocamento). Existem duas formas distintas de medição: a primeira consiste em acoplar extensômetros ao corpo-de-prova, e a segunda em medir o deslocamento de uma placa sobreposta ao corpo-de-prova por meio de relógios comparadores. As vantagens e desvantagens de cada método já foram discutidas na revisão bibliográfica, apresentada por ocasião do primeiro relatório (item 1.7). A medida pelo extensômetro foi adotada para todos os formatos de corpo-de-prova, enquanto os relógios comparadores só foram utilizados para o cubo, uma vez que este tem sido uma prática de alguns laboratórios que fazem a caracterização de argamassas e produtos à base de cimento.

O acoplamento dos extensômetros aos corpos-de-prova foi feito por meio de elásticos, como se pode notar na Figura III-6. Na mesma figura, nota-se que, para os extensômetros de 50mm, foram utilizados dois elásticos, como meio de evitar possíveis escorregamentos dos dispositivos. Já para os de 20mm (caso do prisma), utilizou-se somente um elástico (Figura III-7). Além disso, foram traçadas, sobre o corpo-de-prova, linhas que serviram de guias para o acoplamento dos extensômetros (Figura III-4). Sempre são acoplados dois extensômetros ao corpo-

de-prova, pois o resultado final emitido pelo equipamento é a média entre as medidas de ambos os dispositivos, posicionados em faces paralelas do corpo de prova.



Figura III-6 - Acoplamento dos extensômetros de 50mm ao corpo-de-prova cilíndrico.



Figura III-7 - Acoplamento dos extensômetros de 20mm ao corpo-de-prova prismático.

Para o uso dos relógios comparadores, foram necessários os seguintes componentes: uma placa de aço retificada, apoiada sobre o corpo-de-prova, na qual se basearam as medidas dos relógios; e duas bases magnéticas, nas quais os dois relógios comparadores adotados foram afixados (Figura III-8). Procurou-se posicionar os relógios o mais próximo possível do corpo-de-prova, para se

obter medidas mais representativas. Novamente, o resultado final é a média das leituras dos dois relógios comparadores.



Figura III-8 - Montagem do ensaio de módulo de deformação à compressão para o cubo, com os extensômetros de 50mm acoplados e os relógios comparadores posicionados.

A Figura III-8 foi registrada fora da prensa EMIC, pois a mesma se encontrava em uso. As fotos feitas na data do ensaio se perderam por conta de um disquete defeituoso.

III.2.4. Módulo de deformação à tração na flexão

Novamente, foi necessário lixar os corpos-de-prova, pela mesma razão mencionada para o ensaio de resistência à tração na flexão. O ensaio é ilustrado pela Figura III-9.



Figura III-9 - Ensaio de módulo de deformação à tração na flexão. A deformação é medida através de um LVDT acoplado a uma base magnética.

III.2.5. Módulo de deformação pelo ultrassom

O equipamento de ultrassom utilizado foi o PUNDIT, ilustrado pela Figura III-10. Os transdutores utilizados, para todos os corpos-de-prova, eram de 200kHz. A realização do ensaio está ilustrada pela Figura III-11 e Figura III-12.



Figura III-10 - Equipamento do ensaio de ultrassom (PUNDIT).



Figura III-11 - Realização do ensaio de ultrassom no corpo-de-prova prismático.



Figura III-12 - Realização do ensaio de ultrassom no corpo-de-prova cúbico. À esquerda, encontra-se a barra de calibração (explicações detalhadas no ANEXO B).

O procedimento de ensaio encontra-se no ANEXO B.

III.2.6. Módulo de deformação pela freqüência de ressonância

A montagem do ensaio é ilustrada pela Figura III-13 e pela Figura III-14.

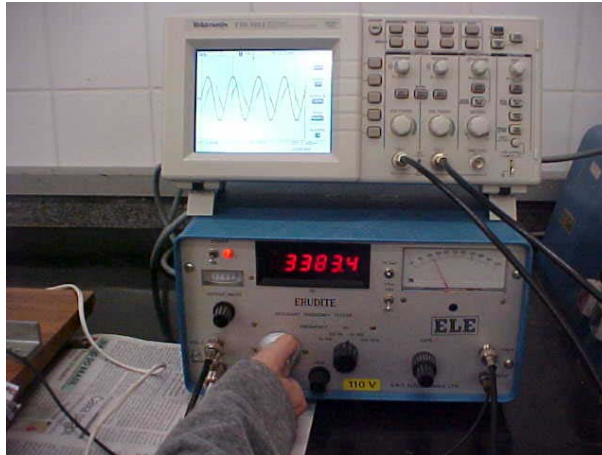


Figura III-13 - Osciloscópio digital (em cima) e oscilador de freqüência digital e sonoro (na parte de baixo).



Figura III-14 - Corpo-de-prova posicionado diagonalmente no suporte; emissor e receptor de ondas.

Na freqüência de ressonância, o oscilador emite um som estridente característico, o que permite identificar esta freqüência e ler o valor indicado no seu visor digital. No entanto, preferiu-se adotar o valor fornecido pelo osciloscópio digital, por ser um instrumento mais preciso.

Para cada corpo-de-prova, o procedimento foi repetido duas vezes, resultando em duas medidas de freqüência de ressonância. Para o traço T1, foram testados dois posicionamentos: o diagonal (Figura III-14) e o horizontal

(Figura III-15), de modo a verificar se esta variável exerceria influência sobre os resultados.

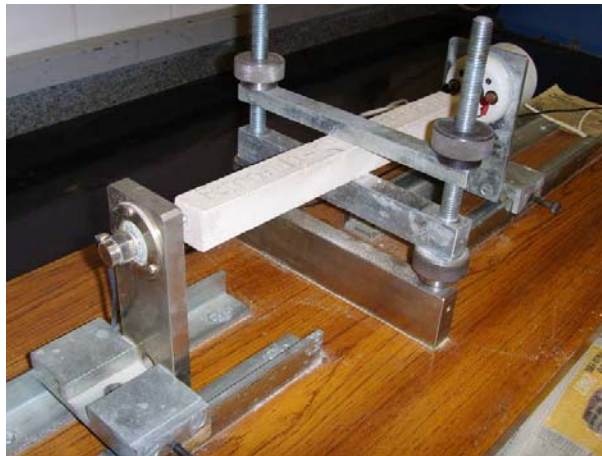


Figura III-15 - Corpo-de-prova posicionado horizontalmente no suporte; receptor e emissor de ondas.

III.3. Apresentação e análise dos resultados da caracterização no estado anidro.

A seguir, é apresentada a síntese dos resultados dos seguintes ensaios: determinação da massa específica, segundo procedimento descrito no ANEXO B; granulometria, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003); e determinação do resíduo insolúvel e sílica, segundo a NBR 6473 (ABNT, 2003). Os resultados detalhados encontram-se no ANEXO C.

III.3.1. Massa específica

A Tabela III-4 mostra os resultados da determinação da massa específica. A balança utilizada no ensaio tem resolução de 0,001g.

Tabela III-4 - Resultados da determinação da massa específica dos materiais empregados no programa experimental.

| | δ_{esp} (g/cm ³) | desv. pad. (g/cm ³) | coef. var. (%) |
|---------|--|------------------------------------|-------------------|
| Areia | 2,62 | 0,02 | 0,75 |
| Cal | 2,23 | 0,01 | 0,24 |
| Cimento | 2,99 | 0,01 | 0,42 |

Comparando-se os valores de densidade de massa específica obtidos com os valores de referência: $\sim 3,0\text{g/cm}^3$ para o cimento, $\sim 2,65\text{g/cm}^3$ para a areia

(FIORITO, 1994) e $\sim 2,3\text{g/cm}^3$ para a cal (GUIMARÃES, 2002), pode-se afirmar que as massas específicas resultantes são condizentes com o esperado. Nota-se que a variabilidade dos resultados é extremamente pequena, devido à alta precisão que o equipamento utilizado para este ensaio possui.

III.3.2. Granulometria

Na Tabela III-5, apresenta-se o resultado da análise granulométrica da areia utilizada. A Figura III-16 representa as curvas granulométricas das duas amostras testadas.

Tabela III-5 - Resultados da análise granulométrica da areia.

| Peneira | Abertura (mm) | % retida acum. 1 | % retida acum. 2 |
|--------------------------------------|---------------|------------------|------------------|
| 1 | 4,76 | 0,0% | 0,0% |
| 2 | 2,38 | 0,0% | 0,0% |
| 3 | 1,19 | 0,0% | 0,0% |
| 4 | 0,59 | 0,2% | 0,2% |
| 5 | 0,297 | 24,0% | 26,8% |
| 6 | 0,149 | 76,6% | 80,6% |
| Fundo | 0 | 100,0% | 100,0% |
| Módulo de finura | | 2,01 | 2,08 |
| ϕ máximo (mm) | | 0,59 | 0,59 |

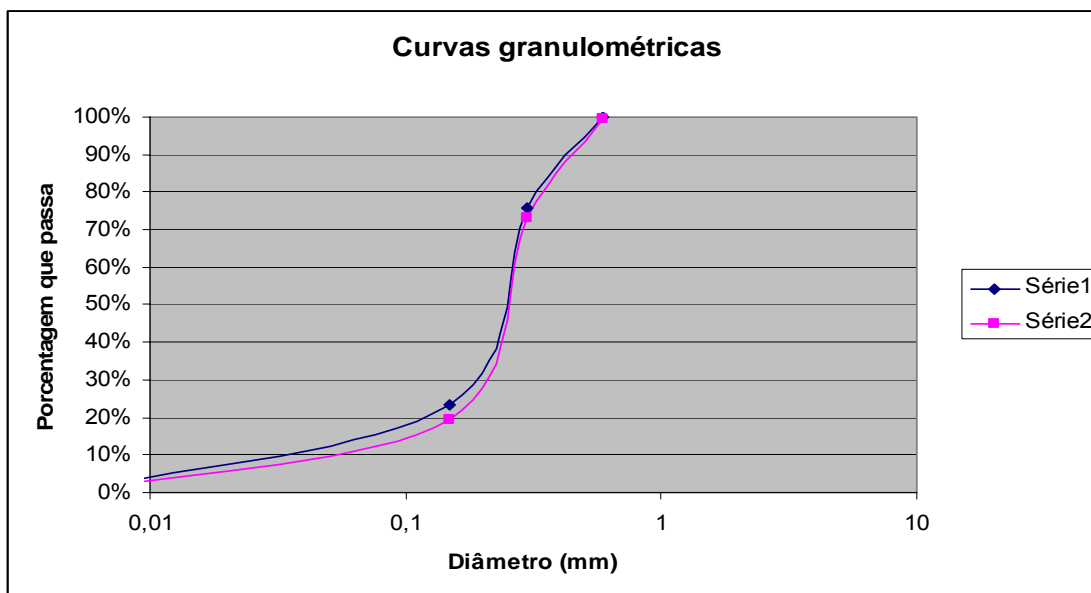


Figura III-16 - Curvas granulométricas das duas amostras da areia empregada no programa experimental.

Os números comprovam que a areia em questão é muito fina, observando-se o módulo de finura resultante (por volta de 2,0 – quanto mais baixo o módulo,

mais fina a areia). Percebe-se também, pela curva granulométrica, que a areia é mal graduada, ou seja, não há uma distribuição ampla do tamanho dos grãos. De acordo com o estudado na revisão bibliográfica, esta areia não se enquadra no perfil de areia para emprego em argamassas, pois favoreceria uma elevada retração. Para se conhecer a distribuição da fração mais fina do solo (que ficou retida no fundo da série de peneiras), seria necessário o emprego da técnica de sedimentação. No entanto, como o objetivo do trabalho não é investigar a influência do agregado nas propriedades da argamassa, uma análise granulométrica mais detalhada não se justifica no momento. Ainda assim, como forma de melhor caracterizar o material, o ensaio de sedimentação poderá ser realizado na continuidade da pesquisa, caso a prorrogação do prazo de pesquisa seja concedida.

III.3.3. Resíduo insolúvel e sílica presentes na cal

O valor que se obteve de porcentagem de resíduo insolúvel e sílica para a cal utilizada é de 1,33%, com coeficiente de variação de 5,32%. Isto permite concluir que a cal em questão é de boa qualidade.

III.4. Apresentação e análise dos resultados dos ensaios de resistência mecânica e de módulo de deformação.

A análise que se apresenta a seguir é fundamentada nos resultados obtidos dos ensaios realizados, considerando-se, ainda, indicadores estatísticos (discutidos no ANEXO A) aplicados aos resultados. Tem como objetivo avaliar a influência dos seguintes aspectos sobre os resultados obtidos: composição e dosagem (representadas pelo traço), formato do corpo-de-prova e tipo de ensaio. Ou seja, busca-se saber se os ensaios conseguem diferenciar de maneira satisfatória um material do outro, qual a influência do formato do corpo-de-prova sobre os resultados e se os vários tipos de ensaio que avaliam a mesma propriedade levam a resultados equivalentes ou correlacionáveis.

Para se avaliar a influência do formato do corpo-de-prova sobre os resultados, foram propostas as comparações apresentadas na Tabela III-6, para cada argamassa.

Tabela III-6 - Comparações a serem estabelecidas para análise da influência do formato do corpo-de-prova sobre os resultados.

| Tipo de ensaio | Formatos cujos resultados terão a sua igualdade testada |
|---|--|
| Resistência à compressão | Cubo |
| | Cilindro |
| | Prisma |
| Resistência à tração na flexão | Placa |
| | Prisma |
| Módulo de deformação pelo ultrassom | Placa |
| | Cubo |
| | Cilindro |
| | Prisma |
| Módulo de deformação à compressão (inicial) | Barra |
| | Cubo |
| | Prisma |
| | Cilindro |

A Tabela III-7 mostra as correspondências a serem estabelecidas, de modo a se verificar a influência do tipo de ensaio nos resultados, assim como a relação entre algumas medidas específicas. O objetivo de cada uma das comparações é descrito a seguir:

- Módulo pelo ultrassom e módulo pela frequência de ressonância: busca-se verificar a igualdade (ou não) entre os métodos dinâmicos de determinação do módulo de deformação;
- Módulo pelo ultrassom e módulo à compressão (tangente inicial): procura-se constatar a teoria de que ambos os valores devem ser equivalentes;
- Comparação entre operadores e direção de medição do módulo pelo ultrassom: deseja-se verificar a possível influência destas variáveis sobre os resultados;
- Comparação entre diferentes modos de posicionamento do corpo-de-prova na medição do módulo pela frequência de ressonância: espera-se observar se esta variável exerce influência sobre os resultados;
- Comparação entre os valores de resistência à compressão obtidos por diferentes prensas (EMIC e a prensa disponível no IPT): buscou-se verificar a influência do equipamento de teste sobre os resultados obtidos.

As siglas utilizadas na Tabela III-7 possuem os seguintes significados:

- MCe: módulo de deformação à compressão pelo extensômetro;

- MCr: módulo de deformação à compressão pelos relógios comparadores;
- MU: módulo de deformação pelo ultrassom;
- P: modo de posicionamento do corpo-de-prova na máquina (P1, P2);
- D: direção (D1, D2);
- OP: operador (OP1, OP2);
- in: inicial.

Tabela III-7 - Comparações a serem estabelecidas para análise da influência do tipo de ensaio sobre os resultados e para estabelecimento de relações entre diferentes dados.

| Formato | Ensaio relacionado | | | Traço |
|----------|--------------------|---|----------|-------|
| Barra | MU | e | MFR | ambos |
| | MFR (P1) | e | MFR (P2) | T1 |
| Cilindro | MU (OP1) | e | MU (OP2) | T1 |
| | MCE (in) | e | MU | ambos |
| Cubo | MCE | e | MCr | ambos |
| | MCE (in) | e | MU | ambos |
| Placa | MU (D1) | e | MU (D2) | ambos |
| Prisma | MU (OP1) | e | MU (OP2) | T1 |
| | MU (D1) | e | MU (D2) | ambos |
| | MCE (in) | e | MU | ambos |

Para se verificar a capacidade de diferenciação de cada ensaio no que diz respeito à dosagem da argamassa, as seguintes comparações serão feitas, conforme a Tabela III-8.

Tabela III-8 - Comparações a serem estabelecidas para análise da diferenciação entre os traços por cada tipo de ensaio.

| Tipo de ensaio | Dado a ser comparado |
|----------------|--|
| RC | Média dos valores dos CPs cúbicos, cilíndricos e prismáticos de cada traço |
| RTF | Média dos valores dos CPs prismáticos e em forma de barra de cada traço |
| MU | Média dos valores de todos os formatos de CP de cada traço |
| MCE | Média dos valores dos CPs cúbicos, cilíndricos e prismáticos de cada traço |
| MFR | Média dos valores dos CPs em forma de barra de cada traço |
| MTF | Média dos valores dos CPs em forma de placa de cada traço |

Além disso, para cada ensaio, analisou-se a variabilidade apresentada, testou-se a suficiência do número de corpos-de-prova, calculou-se o nível de significância α obtido e a semi-amplitude do intervalo de confiança e_0 . A descrição dos métodos estatísticos e dos parâmetros adotados para a realização das comparações e testes citados encontra-se no ANEXO A.

III.4.1. Influência do formato do corpo-de-prova

A seguir, será apresentada somente uma síntese dos resultados, conforme a análise estabelecida. Os resultados completos dos ensaios encontram-se no ANEXO D, e o detalhamento da análise estatística é apresentado no ANEXO E.

III.4.1.1. Resistência à compressão

Os resultados detalhados de resistência à compressão podem ser encontrados no ANEXO D, itens D.2, D.3 e D.5. A síntese destes resultados encontra-se na Tabela III-9 e na Figura III-17.

Tabela III-9 - Comparação entre valores de resistência à compressão para o cilindro, prisma e cubo, para os traços T1 e T2. .

| | | $\sigma_{cilindro}$ (MPa) | σ_{prisma} (MPa) | σ_{cubo} (MPa) | Análise estatística Se $F > F(a,b,p)$, as médias são diferentes (ANEXO A) | | | |
|-------------|------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------|---|-------|----------------|-------|
| Traço T1 | média | 11,19 | 11,79 | 16,14 | st^2 | 5,34 | F | 35,37 |
| | desv. pad. | 0,42 | 0,22 | 1,54 | se^2 | 23,97 | F(2,8,5%) | 4,46 |
| | coef. var. | 3,73% | 1,86% | 9,55% | sr^2 | 0,68 | F > F(2,8,5%) | |
| Traço T2 | média | 3,11 | 2,92 | 2,39 | st^2 | 0,13 | F | 18,24 |
| | desv. pad. | 0,12 | 0,19 | 0,23 | se^2 | 0,66 | F(2,11,5%) | 3,98 |
| | coef. var. | 3,92% | 6,55% | 9,46% | sr^2 | 0,04 | F > F(2,11,5%) | |

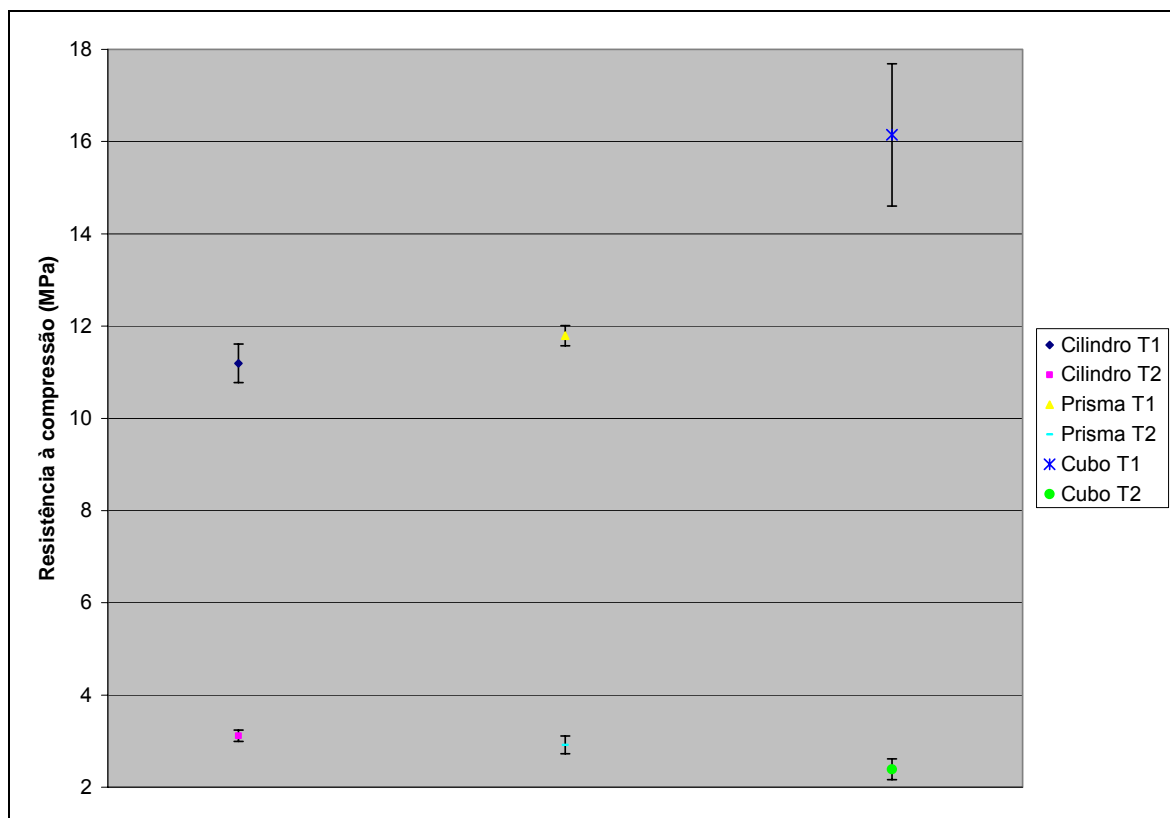


Figura III-17 - Gráfico comparativo dos valores de resistência à compressão para o cilindro, prisma e cubo, para os traços T1 e T2.

Para ambos os traços, os resultados obtidos por diferentes formatos não podem ser considerados iguais, como se pode observar na Tabela III-9. No caso do traço T1, nota-se que o cubo apresenta uma tensão de ruptura muito maior do que as tensões correspondentes aos demais formatos, fato este não observado para o traço T2 (no caso, o cilindro apresenta a maior tensão de ruptura).

De modo a se averiguar a origem da grande diferença que o resultado de resistência à compressão do cubo (traço T1) apresentou, buscou-se testar outros corpos-de-prova na prensa do IPT. Como o cubo de traço T1 foi o único tipo de corpo-de-prova que precisou ser ensaiado no equipamento (devido ao fato que o limite de carga da EMIC é mais baixo do que a carga exigida para este tipo de corpo-de-prova), considerou-se que a prensa poderia ser a fonte de variação. Sendo assim, testaram-se 5 cilindros (3 do traço T1 e 2 do traço T2) no IPT e os resultados foram comparados com aqueles obtidos na EMIC. O formato cilíndrico foi escolhido por ser possível ensaiá-lo em ambas as prensas. Como se pode observar na Tabela III-10 e na Figura III-18 não houve diferença significativa entre os resultados obtidos.

Tabela III-10 - Comparação entre resultados de resistência à compressão obtidos com diferentes prensas para o cilindro, para os traços T1 e T2.

| | | Resistência EMIC | Resistência IPT |
|----------|------------------|------------------|---|
| TRAÇO T1 | média (MPa) | 11,19 | 11,56 |
| | desv. pad. (MPa) | 0,42 | 0,41 |
| | coef. var. (%) | 3,73% | 3,56% |
| | t | -1,16 | Conclusão: como $ t < t_{crit}$, aceito H_0 . Logo, as médias são iguais. |
| | w1 | 0,04 | |
| | w2 | 0,06 | |
| | v | 6,50 | |
| tcrit | 2,45 | | |
| TRAÇO T2 | média (MPa) | 3,11 | 3,54 |
| | desv. pad. (MPa) | 0,12 | 0,55 |
| | coef. var. (%) | 3,92% | 15,66% |
| | t | -1,31 | Conclusão: como $ t < t_{crit}$, aceito H_0 . Logo, as médias são iguais. |
| | w1 | 0,00 | |
| | w2 | 0,15 | |
| | v | 1,15 | |
| tcrit | 12,71 | | |

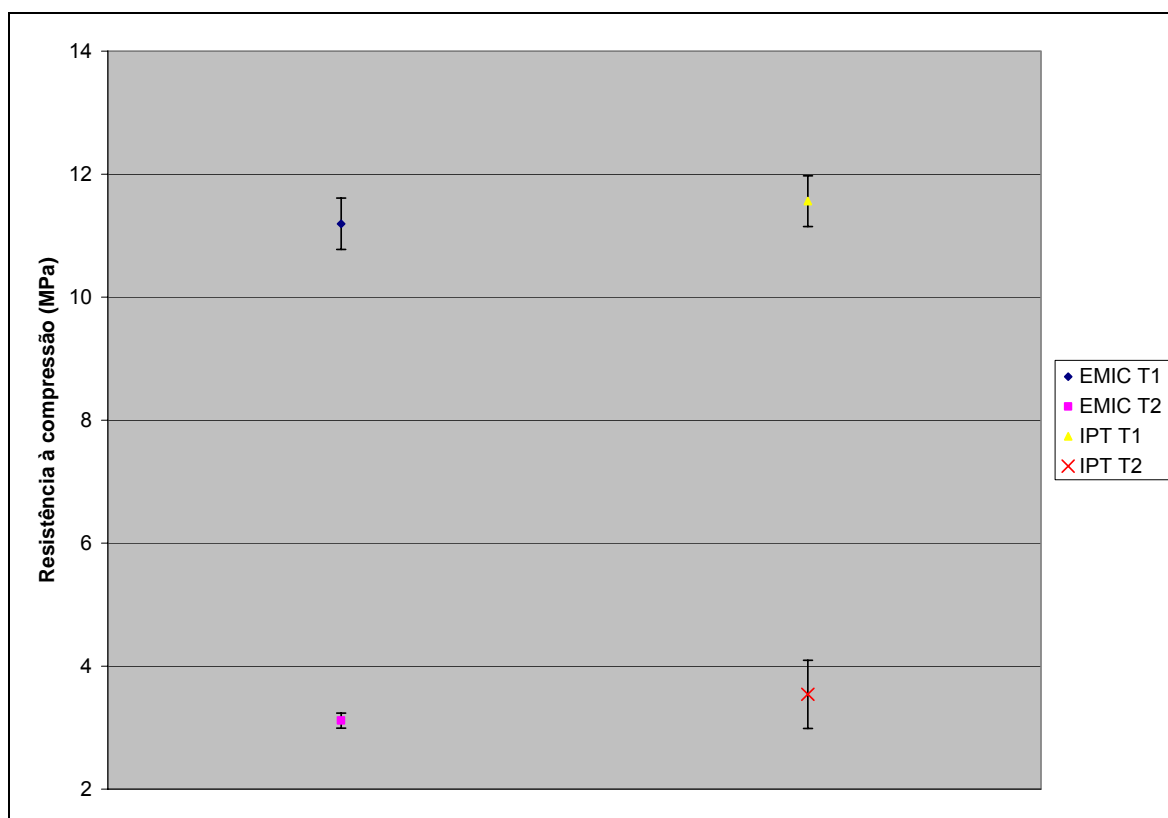


Figura III-18 - Valores de resistência à compressão obtidos por diferentes prensas (IPT e EMIC-POLI) para o cilindro, para os traços T1 e T2.

Portanto, a análise permite afirmar que o formato dos corpos de prova exerce influência sobre os resultados de resistência à compressão.

III.4.1.2. Resistência à tração na flexão

No ANEXO D, itens D.4 e D.5, encontram-se os resultados detalhados de resistência à tração na flexão. A síntese destes resultados encontra-se na Tabela III-11 e na Figura III-19.

Tabela III-11 - Comparação entre valores de resistência à tração na flexão para a placa e o prisma, para os traços T1 e T2.

| | | σ_{placa} (MPa) | σ_{prisma} (MPa) | Análise estatística Se $ t > t_{\text{crit}}$, as médias são diferentes | | | |
|----------|------------|----------------------------------|-----------------------------------|--|-------|------------------------|------|
| Traço T1 | média | 2,11 | 2,73 | t | -8,13 | t _{crit} | 2,36 |
| | desv. pad. | 0,02 | 0,21 | v | 7,29 | t > t _{crit} | |
| | coef. var. | 0,78% | 7,76% | α | 0,05 | | |
| Traço T2 | média | 0,78 | 0,92 | t | -2,50 | t _{crit} | 2,57 |
| | desv. pad. | 0,08 | 0,09 | v | 5,87 | t < t _{crit} | |
| | coef. var. | 9,72% | 9,30% | α | 0,05 | | |

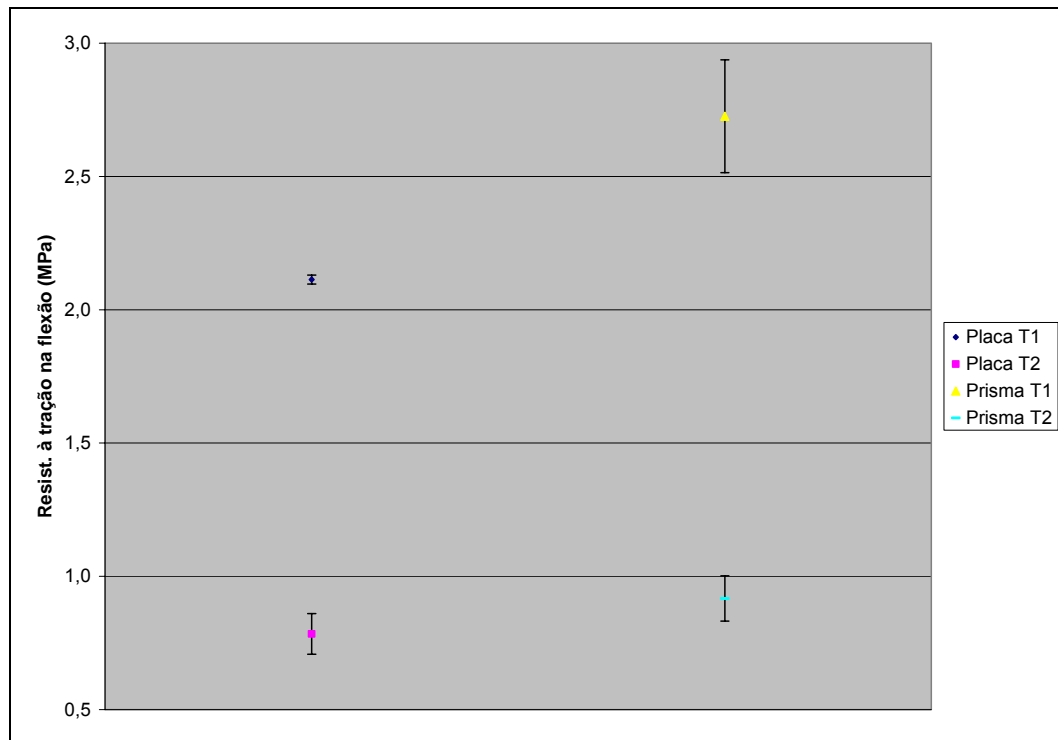


Figura III-19 - Gráfico comparativo dos valores de resistência à tração na flexão para a placa e o prisma, para os traços T1 e T2.

Para o traço T1, o teste estatístico detecta uma diferença entre os resultados da placa e do prisma. No entanto, considerando o traço T2, o teste afirma a igualdade entre as médias, ou seja, não haveria uma influência do formato sobre os resultados (vide Tabela III-11). Uma hipótese para esta constatação é que a sensibilidade da célula de carga utilizada não seria grande o suficiente para registrar as pequenas cargas de ruptura presentes para os corpos-de-prova do traço mais fraco e, portanto, não seria possível diferenciá-las. Na Tabela III-12, encontram-se os valores de capacidade e sensibilidade para as células de carga utilizadas neste ensaio.

Tabela III-12 - Valores de capacidade de carga e sensibilidade para as células de carga utilizadas, de acordo com a prensa.

| Prensa | Capacidade da célula (kN) | Sensibilidade |
|---------------|----------------------------------|-------------------------|
| Instron | 1 | 0,25% do valor da carga |
| EMIC | 100 | 1N |

Além disso, é possível notar que os valores obtidos com o prisma são maiores do que os obtidos com a placa. Pode-se observar ainda que a variabilidade resultante é menor no traço T1 do que no traço T2.

Nota-se, portanto, a necessidade de uma análise da interferência da sensibilidade da célula de carga sobre os resultados, por meio, por exemplo, da seguinte avaliação: intensidade da carga vs. sensibilidade da célula de carga. Além disso, também é necessário um estudo para se verificar o motivo pelo qual o valor de resistência mecânica resultou maior para o prisma. Sugere-se a realização destas investigações como motivação para trabalhos futuros.

Até então, para este tipo de ensaio, não é possível estabelecer nenhuma conclusão definitiva sobre a influência do formato do corpo-de-prova.

III.4.1.3. Módulo de deformação pelo ultrassom

Os resultados de módulo de deformação pelo ultrassom estão apresentados no ANEXO D, do item D.1 ao item D.5. A síntese destes resultados encontra-se na Tabela III-13 e na Figura III-20.

Tabela III-13 - Comparação entre valores de módulo de deformação pelo ultrassom, para corpos-de-prova em forma de cilindro, cubo, prisma, placa e barra, para os traços T1 e T2.

| | | Ecilindro (GPa) | Ecubo (GPa) | Eprisma long. (GPa) | Eplaca long. (GPa) | EBarra (GPa) | Análise estatística Se $F > F(a,b,p)$, as médias são diferentes (ANEXO A) | | | |
|----------|------------|-----------------|-------------|---------------------|--------------------|--------------|---|-------|----------------|--------|
| Traço T1 | média | 12,16 | 16,55 | 14,06 | 11,34 | 12,70 | st ² | 3,60 | F | 246,05 |
| | desv. pad. | 0,38 | 0,32 | 0,74 | 0,24 | 0,74 | se ² | 75,33 | F(4,87,5%) | 2,48 |
| | coef. var. | 3,15% | 1,93% | 5,25% | 2,10% | 5,80% | sr ² | 0,31 | F > F(4,87,5%) | |
| Traço T2 | média | 4,43 | 3,71 | 4,99 | 4,87 | 6,01 | st ² | 0,40 | F | 127,51 |
| | desv. pad. | 0,15 | 0,18 | 0,25 | 0,31 | 0,33 | se ² | 6,10 | F(4,65,5%) | 2,51 |
| | coef. var. | 3,29% | 4,93% | 4,98% | 6,43% | 5,46% | sr ² | 0,05 | F > F(4,65,5%) | |

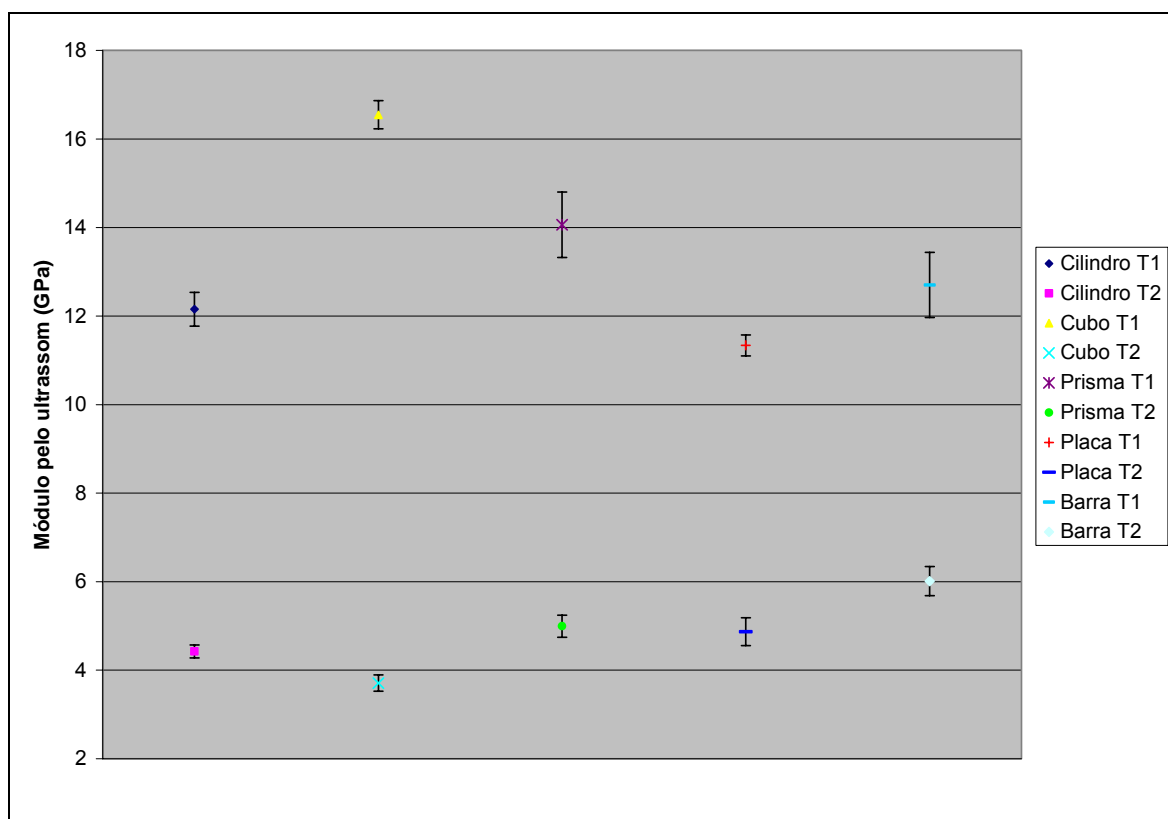


Figura III-20 - Gráfico comparativo dos valores de módulo de deformação pelo ultrassom, para os corpos-de-prova em forma de cilindro, cubo, prisma, barra e placa, para os traços T1 e T2.

Para ambos os traços, é notável a influência do formato sobre os resultados de módulo de deformação, pois não se verifica a igualdade entre os valores distintos (Tabela III-13). Mesmo quando são excluídos os valores extremos, que, no caso do traço T1, pertencem ao cubo e à barra e, para o traço T2, correspondem aos valores do cubo e da placa, os demais resultados não podem ser considerados iguais (vide análise detalhada no ANEXO E).

Considerando o traço T1, a ordem decrescente dos valores de módulo de deformação é a seguinte: cubo, prisma, barra, cilindro e placa. Já para o traço T2,

esta ordem é: barra, prisma, placa, cilindro e cubo. Portanto, não se nota uma tendência entre os formatos, pois o cubo, por exemplo, que apresenta o menor valor de módulo de deformação para o traço T1, passa a apresentar o maior valor no caso do traço T2.

Sendo assim, pode-se afirmar que os resultados do ensaio de módulo de deformação pelo ultrassom são influenciados pelo formato do corpo de prova. No entanto, não há uma tendência explícita para cada formato, pois parece haver uma influência quanto à dosagem utilizada.

III.4.1.4. Módulo de deformação à compressão

Os resultados de módulo de deformação à compressão encontram-se no ANEXO D, nos itens D.2, D.3 e D.5. Para realização da análise que se apresenta neste item, foram considerados somente os valores de módulo de deformação à compressão inicial, medidos com extensômetro, cuja síntese dos resultados encontra-se na Tabela III-14 e na Figura III-21.

Tabela III-14 - Comparação entre valores de módulo de deformação à compressão inicial, pelo extensômetro, para o cilindro, cubo e prisma, para os traços T1 e T2.

| | | Ecilindro (GPa) | Ecubo (GPa) | Eprisma (GPa) | Análise estatística Se $F > F(a,b,p)$, as médias são diferentes (ANEXO A) | | | |
|-------------|------------|--------------------|----------------|------------------|--|-------|----------------|------|
| Traço T1 | média | 11,70 | 14,57 | 16,69 | st ² | 14,74 | F | 5,86 |
| | desv. pad. | 0,88 | 3,85 | 4,14 | se ² | 65,24 | F(2,28,5%) | 3,34 |
| | coef. var. | 7,50% | 26,44% | 24,81% | sr ² | 11,14 | F > F(2,28,5%) | |
| Traço T2 | média | 4,77 | 4,13 | 4,33 | st ² | 0,59 | F | 1,70 |
| | desv. pad. | 0,43 | 1,01 | 0,79 | se ² | 0,94 | F(3,23,5%) | 3,42 |
| | coef. var. | 9,08% | 24,38% | 18,23% | sr ² | 0,55 | F < F(2,23,5%) | |

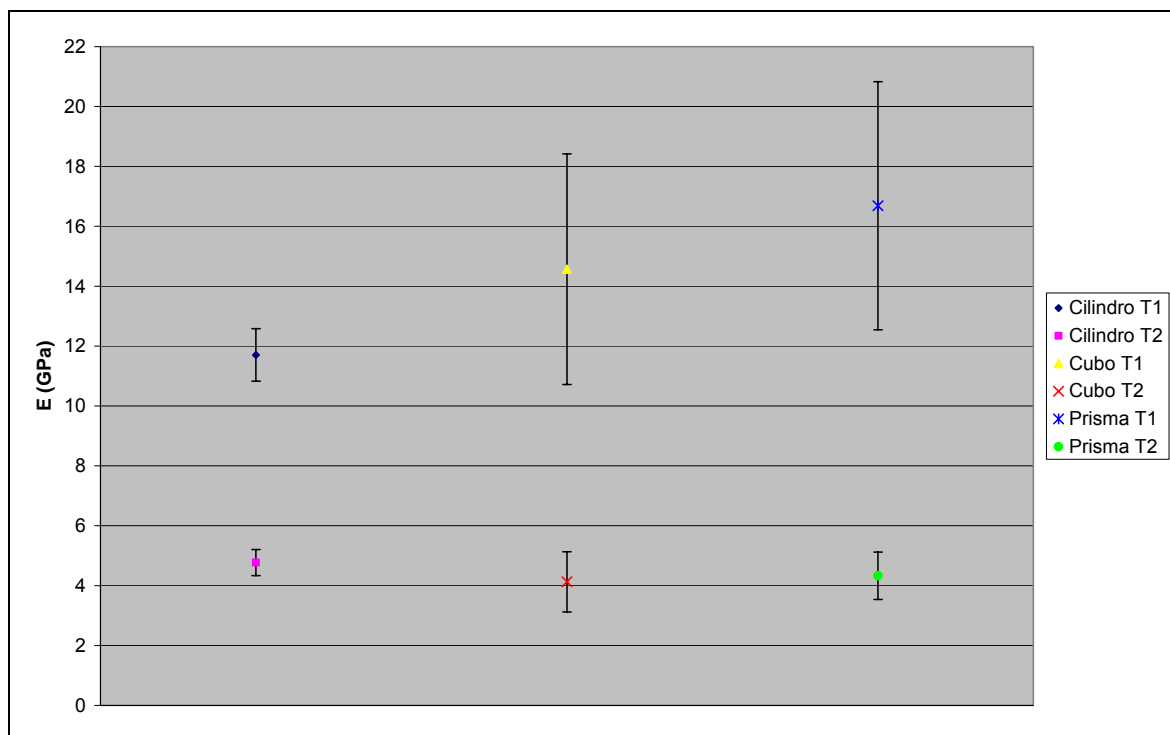


Figura III-21 - Gráfico comparativo dos valores de módulo de deformação à compressão inicial do cilindro, cubo e prisma, para os traços T1 e T2.

Para o traço T1, os valores de módulo de deformação não podem ser considerados iguais, conforme a Tabela III-14. A diferença entre estes valores é considerável, inclusive em termos práticos, como se pode observar pela Figura III-21. Já no caso do traço T2, os valores de módulo encontram-se mais próximos e a igualdade entre eles se verifica (Tabela III-14).

Ao se analisar os resultados obtidos para os diferentes corpos-de-prova, esperava-se, ao se comparar os dois traços estudados, que se tivesse uma tendência de resultados, ou seja, se para um determinado corpo-de-prova o módulo encontrado era o mais elevado do conjunto, para o outro traço isto também ocorreria. No entanto, esta expectativa não foi confirmada. Este fato ocorreu também para o ensaio com o ultrassom (item III 4.1.3).

Portanto, para o ensaio de módulo de deformação, acredita-se que haja uma forte dependência entre a dosagem da argamassa e o grau de influência do formato de corpo-de-prova sobre os resultados.

Um outro fator que poderá ser investigado em trabalhos futuros é quanto à sensibilidade dos equipamentos envolvidos com o ensaio, pois para o traço mais fraco (T2), não se registrou diferença significativa nos resultados do módulo para os distintos corpos de prova (ver teste estatístico na Tabela III-14).

III.4.2. Influência do tipo de ensaio para um determinado formato de corpo-de-prova

Para cada ensaio, primeiramente, foram testados a suficiência do número de corpos de prova, o nível de significância alcançado e a semi-amplitude do intervalo de confiança e_0 obtida a um nível de significância de 5%. A explicação destes parâmetros, bem como das ferramentas estatísticas utilizadas encontra-se no ANEXO A. Após estes testes, foram verificadas as igualdades e relações de interesse, conforme descrito na Tabela III-7. A seguir, apresentam-se os resultados das análises separados por formato de corpo-de-prova.

III.4.2.1. Influência do tipo de ensaio para a barra

O resumo dos resultados obtidos para os ensaios aos quais os corpos-de-prova foram submetidos encontra-se na Tabela III-15 e na Figura III-22. Os resultados completos encontram-se no ANEXO D, item D.1.

Tabela III-15 - Resultados do módulo de deformação dinâmico pelo ultrassom e pela frequência de ressonância para a barra, para os traços T1 e T2.

| Traço | Parâmetros | Ultrassom | Freq. de ressonância (diagonal) | Frequência de ressonância (horizontal) |
|--------------|-------------------|------------------|--|---|
| TRAÇO T1 | média (GPa) | 12,70 | 11,47 | 11,51 |
| | desv. pad. (GPa) | 0,74 | 0,63 | 0,69 |
| | coef. var. (%) | 5,80% | 5,54% | 6,03% |
| TRAÇO T2 | média (GPa) | 6,01 | 6,51 | - |
| | desv. pad. (GPa) | 0,33 | 0,33 | |
| | coef. var. (%) | 5,46% | 5,08% | |

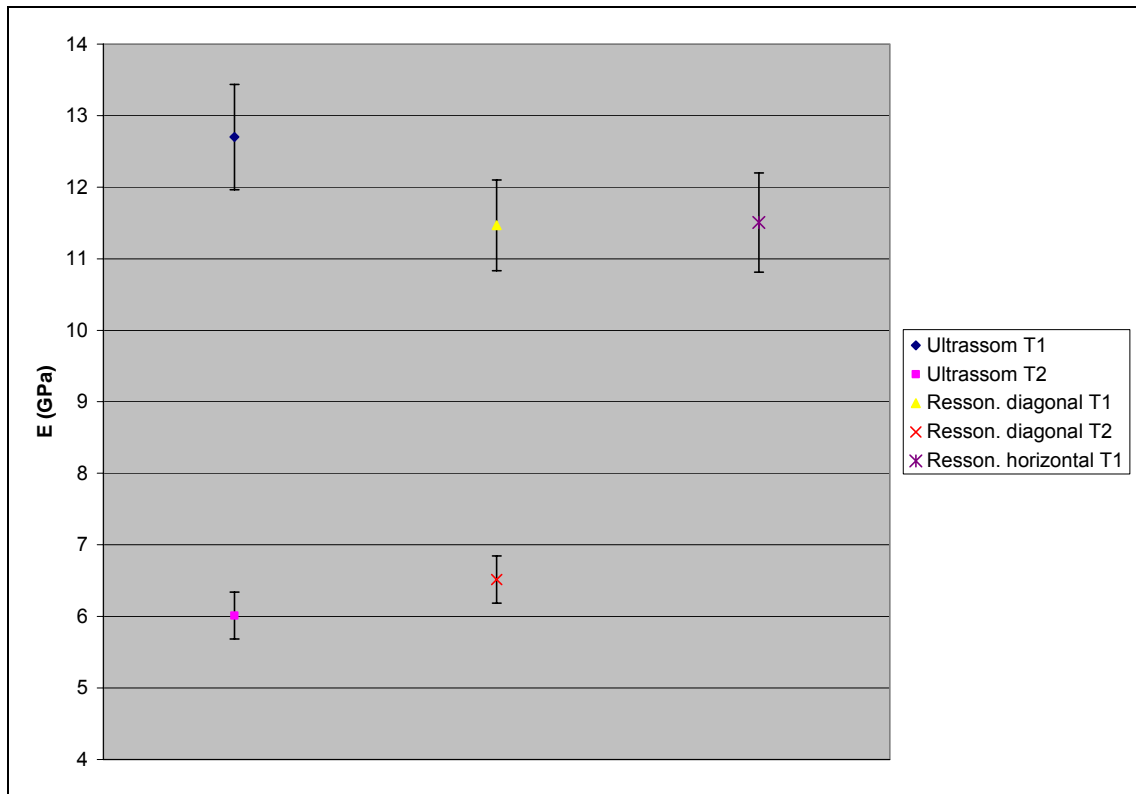


Figura III-22 - Apresentação dos resultados de módulo de deformação pelo ultrassom e pela frequência de ressonância, para a barra, para os traços T1 e T2..

Na Tabela III-16, apresentam-se os testes de verificação da suficiência do número de corpos-de-prova, assim como o cálculo do nível de significância e da semi-amplitude do intervalo de confiança obtidos.

Tabela III-16 - Testes de suficiência, nível de significância e semi-amplitude para a barra, para os traços T1 e T2.

| | | Ultrassom | Freq. de ressonância (diagonal) | Freq. de ressonância (horizontal) |
|---|---------------|-----------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Teste da suficiência do número de corpos-de-prova | | | | |
| TRAÇO T1 | n necess. | 2 | 2 | 2 |
| | n real | 20 | 20 | 20 |
| | suficiência | OK | OK | OK |
| TRAÇO T2 | n necess. | 6 | 5 | - |
| | n real | 3 | 3 | |
| | suficiência | NÃO OK | NÃO OK | |
| Determinação do nível de significância | | | | |
| TRAÇO T1 | $z(\alpha/2)$ | 7,71 | 8,08 | 7,42 |
| | α | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| | $1-\alpha$ | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| TRAÇO T2 | $z(\alpha/2)$ | 3,17 | 3,41 | - |
| | α | 0,16% | 0,06% | |
| | $1-\alpha$ | 99,84% | 99,94% | |
| Determinação de e_0 sendo $\alpha = 5\%$ | | | | |
| TRAÇO T1 | e_0 (GPa) | 0,32 | 0,28 | 0,30 |
| | % média | 2,54% | 6,44% | 7,02% |
| TRAÇO T2 | e_0 (GPa) | 0,37 | 0,37 | - |
| | % média | 6,17% | 5,75% | |

No que diz respeito à suficiência do número de corpos de prova, para o traço T1, foram utilizados 20 corpos-de-prova em todos os ensaios, número considerado satisfatório, conforme se verifica na Tabela III-16.

Deste modo, obteve-se uma confiabilidade muito alta, conforme indica o nível de confiança $1-\alpha$ de 100%, resultante dos testes estatísticos. Contudo, este é somente um dado matemático, pois não é possível obter uma confiança total nos ensaios (vide explicação no ANEXO A). Para o traço T2, por sua vez, houve o problema de que a maioria dos corpos-de-prova, na forma de barra, fissuraram durante a secagem, devido à elevada retração que apresentaram, restando somente três para serem submetidos aos ensaios. Decidiu-se não descartar estes corpos-de-prova, ensaiando-os. O número reduzido de corpos-de-prova (insuficiência comprovada pela análise apresentada Tabela III-16) introduziu uma dificuldade na análise estatística, pois a aproximação dos resultados pela distribuição normal já não é precisa. Nota-se, por exemplo, a incoerência dos resultados dos testes de nível de significância (que fornece níveis abaixo de 5%, o que se mostra incongruente com o teste de suficiência), e de semi-amplitude (que

resulta em e_0 menor que 10% da média), motivo pelo qual estes últimos resultados sequer devam ser considerados.

Foram confrontados os resultados de módulo pelo ultrassom e pela frequência ressonante (para o traço T1, escolheu-se o posicionamento diagonal, embora esta variável não exerça influência, como discutido anteriormente), e o resultado desta análise está apresentado na Tabela III-17.

Tabela III-17 - Comparação entre o módulo de deformação pelo ultrassom e pela frequência de ressonância para a barra de traço T1.

| | | Ultrassom | Freq. de ressonância (diagonal) | Δ |
|----------|------------------|-----------|--|----------|
| TRAÇO T1 | média (GPa) | 12,70 | 11,47 | 1,23 |
| | desv. pad. (GPa) | 0,74 | 0,63 | 0,59 |
| | coef. var. (%) | 5,80% | 5,54% | - |
| | dmédio | 1,23 | Conclusão: como $ t > t_{crit}$, rejeito H_0 . Logo, as médias não são iguais. | |
| | sd | 0,59 | | |
| | n | 20 | | |
| | t | 9,31 | | |
| | Graus de lib. | 19 | | |
| | tcrit. | 2,09 | | |
| TRAÇO T2 | média (GPa) | 6,01 | 6,51 | -0,50 |
| | desv. pad. (GPa) | 0,33 | 0,33 | 0,31 |
| | coef. var. (%) | 5,46% | 5,08% | - |
| | dmédio | -0,50 | Conclusão: como $ t < t_{crit}$, aceito H_0 . Logo, as médias são iguais. | |
| | sd | 0,31 | | |
| | n | 3 | | |
| | t | -2,76 | | |
| | Graus de lib. | 2 | | |
| tcrit. | 4,30 | | | |

Para o traço T1, conclui-se que as médias não podem ser consideradas iguais, sendo o valor obtido pelo ultrassom maior do que aquele proveniente do ensaio de frequência de ressonância em 1,23GPa. Contudo, pela ordem de grandeza obtida para o módulo, é possível afirmar que, na prática, esta não é uma diferença significativa. Já no caso do traço T2, o resultado do teste deve ser considerado somente como um indicativo, pois o reduzido número de corpos-de-prova faz com que este resultado não seja tão consistente.

Para o traço T1, compararam-se também os resultados obtidos a partir de dois diferentes modos de posicionamento do corpo-de-prova no apoio – diagonal

e horizontal. A síntese desta comparação encontra-se na Tabela III-18 e a conclusão é que o posicionamento do corpo-de-prova não exerce influência sobre os resultados de módulo de deformação pela frequência ressonante, como mostra também a Figura III-22.

Tabela III-18 - Comparação entre os resultados do módulo de deformação para dois diferentes posicionamentos do corpo-de-prova de barra de traço T1.

| | Freq. de ressonância (diagonal) | Frequência de ressonância (horizontal) | Δ |
|------------------|---------------------------------|---|----------|
| média (GPa) | 11,47 | 11,51 | -0,04 |
| desv. pad. (GPa) | 0,63 | 0,69 | 0,44 |
| coef. var. (%) | 5,54% | 6,03% | - |
| dmédio | -0,04 | <i>Conclusão: como $t < t_{crit}$, aceito H_0. Logo, as médias são iguais.</i> | |
| sd | 0,44 | | |
| n | 20 | | |
| t | -0,41 | | |
| Graus de lib. | 19 | | |
| tcrit. | 2,09 | | |

III.4.2.2. Influência do tipo de ensaio para o cilindro

Na Tabela III-19 e na Figura III-23, encontra-se a síntese dos resultados obtidos pelos diferentes ensaios para o corpo de prova cilíndrico. Os resultados detalhados para o cilindro podem ser encontrados no ANEXO D, item D.2.

Tabela III-19 - Resultados de módulo de deformação e resistência à compressão para o cilindro, para os traços T1 e T2.

| | | Ultrassom (OP1) | Ultrassom (OP2) | Módulo à compressão (inicial) | Módulo à compressão (tg50%) | Módulo à compressão (corda 10%/50%) | Resistência à compressão* |
|----------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| TRAÇO T1 | média (GPa)* | 12,16 | 12,27 | 11,70 | 7,73 | 9,34 | 11,19 |
| | desv. pad. (GPa)* | 0,38 | 0,42 | 0,88 | 0,67 | 0,71 | 0,42 |
| | coef. var. (%) | 3,15% | 3,44% | 7,50% | 8,71% | 7,63% | 3,73% |
| TRAÇO T2 | média (GPa)* | 4,43 | - | 4,77 | 3,20 | 3,68 | 3,11 |
| | desv. pad. (GPa)* | 0,15 | | 0,43 | 0,30 | 0,36 | 0,12 |
| | coef. var. (%) | 3,29% | | 9,08% | 9,41% | 9,86% | 3,92% |

* Os valores referentes à resistência estão em MPa

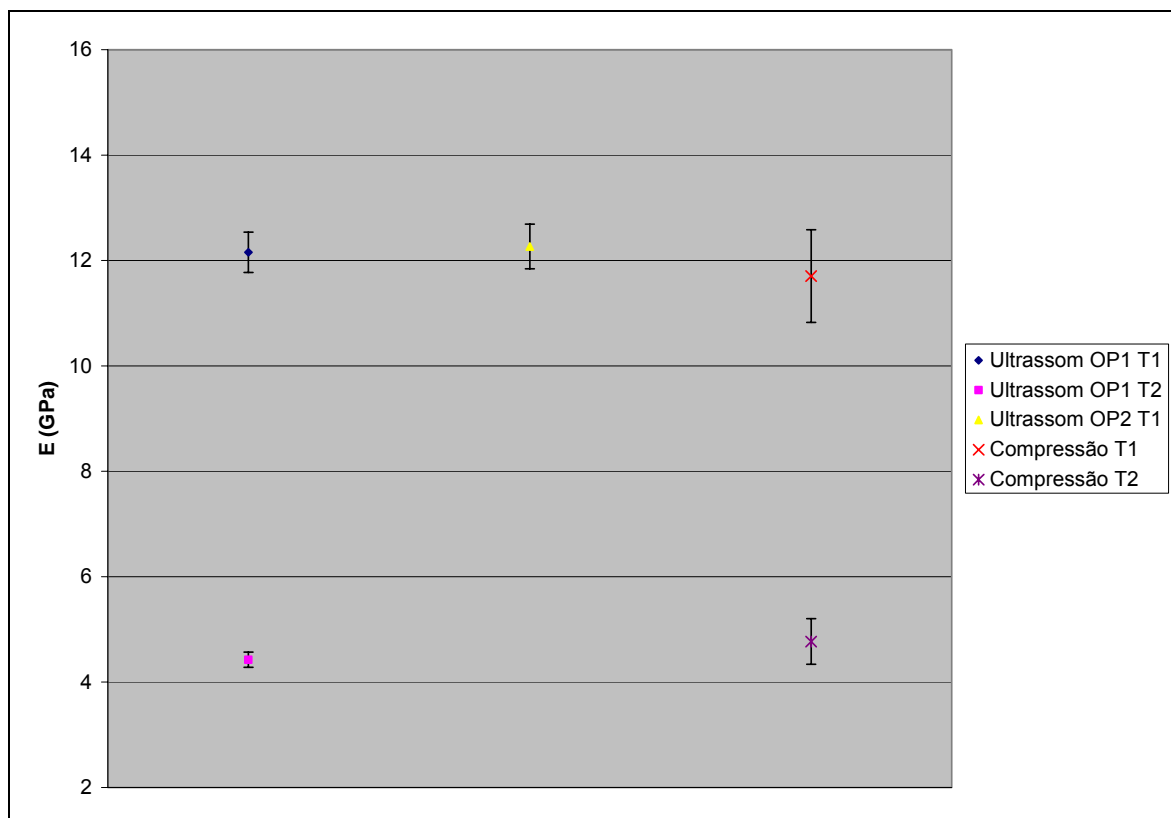


Figura III-23 - Apresentação dos resultados de módulo dinâmico pelo ultrassom (diferentes operadores) e módulo de deformação à compressão inicial para o cilindro, para os traços T1 e T2.

Procurou-se, primeiramente, verificar a suficiência do número de corpos-de-prova para os diferentes ensaios aos quais o cilindro foi submetido. Os testes realizados encontram-se na Tabela III-20.

Tabela III-20 - Testes de suficiência, nível de significância e semi-amplitude para o cilindro, para os traços T1 e T2.

| | | Ultrassom | Módulo à compressão (inicial) | Resistência à compressão* |
|--|---------------|-----------|-------------------------------|---------------------------|
| Teste da suficiência do número de corpos-de-prova | | | | |
| TRAÇO T1 | n nec. | 1 | 3 | 2 |
| | n real | 20 | 10 | 4 |
| | suficiência | OK | OK | OK |
| TRAÇO T2 | n nec. | 1 | 5 | 2 |
| | n real | 20 | 10 | 4 |
| | suficiência | OK | OK | OK |
| Determinação do nível de significância | | | | |
| TRAÇO T1 | $z(\alpha/2)$ | 7,71 | 7,42 | 8,08 |
| | α | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| | $1-\alpha$ | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| TRAÇO T2 | $z(\alpha/2)$ | 13,61 | 3,48 | 5,10 |
| | α | 0,00% | 0,06% | 0,00% |
| | $1-\alpha$ | 100,00% | 99,94% | 100,00% |
| Determinação de e_0 sendo $\alpha = 5\%$ | | | | |
| TRAÇO T1 | e_0 (GPa)* | 0,32 | 0,30 | 0,28 |
| | % média | 2,54% | 7,02% | 6,44% |
| TRAÇO T2 | e_0 (GPa)* | 0,06 | 0,27 | 0,12 |
| | % média | 1,44% | 5,63% | 3,84% |
| * Os valores referentes à resistência estão em MPa | | | | |

Verifica-se que o número de corpos-de-prova, para ambos os traços, foi suficiente em todos os ensaios (Tabela III-20). Deste modo, o nível de confiança obtido foi alto (a questão do $\alpha = 0\%$ já foi discutida anteriormente), e os intervalos de confiança para os resultados se mostraram satisfatórios. Não foram testados o módulo tangente a 50% e o módulo corda (10%/50%), pois o objetivo aqui é verificar a suficiência do número de corpos-de-prova. Como ambos os valores são obtidos a partir dos mesmos resultados experimentais que o módulo tangente inicial, decidiu-se por este último como parâmetro representativo do ensaio para o cálculo da suficiência. Estão sendo calculados estes três tipos de módulo à compressão, pois todos eles são utilizados como referências para o módulo de deformação. Pretende-se investigar, na próxima etapa, qual é o significado físico de cada uma destas grandezas.

Na Tabela III-21, encontra-se a comparação entre valores de módulo obtidos pelo ultrassom ou pela compressão (valor tangente inicial). Esta comparação também é ilustrada na Figura III-23 com os valores de ultrassom do operador 1 (OP1).

Tabela III-21 - Comparação entre os valores de módulo pelo ultrassom e à compressão inicial obtidos para o cilindro, para os traços T1 e T2.

| | | Ultrassom | Módulo à compressão (inicial) | Δ |
|----------|------------------|-----------|--|----------|
| TRAÇO T1 | média (GPa) | 12,25 | 11,70 | 0,54 |
| | desv. pad. (GPa) | 0,32 | 0,88 | 0,87 |
| | coef. var. (%) | 2,60% | 7,50% | - |
| | dmédio | 0,54 | <i>Conclusão: como $t < t_{crit}$, aceito H_0. Logo, as médias são iguais.</i> | |
| | sd | 0,87 | | |
| | n | 10 | | |
| | t | 1,97 | | |
| | Graus de lib. | 9 | | |
| tcrit. | 2,26 | | | |
| TRAÇO T2 | média (GPa) | 4,38 | 4,77 | -0,39 |
| | desv. pad. (GPa) | 0,12 | 0,43 | 0,52 |
| | coef. var. (%) | 2,74% | 9,08% | - |
| | dmédio | -0,39 | <i>Conclusão: como $t > t_{crit}$, rejeito H_0. Logo, as médias não são iguais.</i> | |
| | sd | 0,52 | | |
| | n | 10 | | |
| | t | -2,37 | | |
| | Graus de lib. | 9 | | |
| tcrit. | 2,26 | | | |

Conclui-se, para a argamassa de traço T1, que os valores podem ser considerados iguais. Já para a outra dosagem, a conclusão fornecida pelo teste é de que os módulos são considerados diferentes (Tabela III-21). No entanto, analisando-se a diferença absoluta entre ambos os valores, observa-se que esta é menor do que o mesmo valor obtido para o traço T1 (0,39 contra 0,54GPa). Esta é uma das dificuldades encontradas na análise da conclusão fornecida pelo teste de comparação entre duas médias, e as razões para este fenômeno estão apresentadas no ANEXO A.

Procurou-se também, para o traço T1, verificar a influência do operador sobre os resultados. Para isto, dois operadores distintos realizaram as medidas em todos os corpos-de-prova disponíveis, e o resultado desta comparação encontra-se na Tabela III-22, sendo ilustrado também pela Figura III-23. Embora,

pelo teste, as médias não possam ser consideradas iguais, isto se deve à pequena variabilidade obtida nos ensaios de ultrassom, que interfere na fórmula utilizada para esta determinação (ANEXO A). Na prática, os valores de 12,16 e 12,27GPa podem ser considerados iguais, e, portanto, conclui-se que o operador não exerce influência sobre o resultado deste tipo de ensaio.

Tabela III-22 - Comparação entre os valores de módulo de deformação pelo ultrassom obtidos por diferentes operadores para o cilindro de traço T1.

| | Ultrassom (OP1) | Ultrassom (OP2) | Δ |
|------------------|-----------------|--|----------|
| média (GPa) | 12,16 | 12,27 | -0,11 |
| desv. pad. (GPa) | 0,38 | 0,42 | 0,15 |
| coef. var. (%) | 3,15% | 3,44% | - |
| dmédio | -0,11 | <i>Conclusão: como $t > t_{crit}$, rejeito H_0. Logo, as médias não são iguais.</i> | |
| sd | 0,15 | | |
| n | 20 | | |
| t | -3,21 | | |
| Graus de lib. | 19 | | |
| tcrit. | 2,09 | | |

III.4.2.3. Cubo

Uma síntese dos resultados obtidos para avaliação do módulo de deformação empregando-se o cubo como corpo de prova e diferentes métodos de avaliação é apresentada na Tabela III-23. Os resultados completos para este formato de corpo-de-prova podem ser encontrados no ANEXO D, item D.3.

Tabela III-23 - Resultados de resistência à compressão e módulo de deformação para o cubo, para os traços T1 e T2.

| | Ultrassom | Extensômetro | | | Relógios comparadores | Resistência à compressão* | |
|----------|-------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------|
| | | Módulo à compressão (inicial) | Módulo à compressão (tg50%) | Módulo à compressão (corda 10%/50%) | Módulo à compressão (tg50%) | | |
| TRAÇO T1 | média (GPa)* | 16,55 | 16,08 | 6,31 | 10,05 | 6,01 | 15,30 |
| | desv. pad. (GPa)* | 0,32 | 2,45 | 0,37 | 0,83 | 0,43 | 0,68 |
| | coef. var. (%) | 1,93% | 15,21% | 5,82% | 8,25% | 7,14% | 4,45% |
| TRAÇO T2 | média (GPa)* | 3,71 | 4,13 | 1,07 | 2,19 | 0,57 | 2,39 |
| | desv. pad. (GPa)* | 0,18 | 1,01 | 0,24 | 0,37 | 0,07 | 0,23 |
| | coef. var. (%) | 4,93% | 24,38% | 22,64% | 16,94% | 13,04% | 9,46% |

* Os valores referentes à resistência estão em MPa

Para ambos os traços, somente para o ensaio de módulo de deformação pelo ultrassom o teste indica a suficiência do número de corpos-de-prova utilizado (Tabela III-24). No entanto, a confiabilidade atingida para os valores de resistência à compressão e módulo estático ainda pode ser considerada satisfatória, a não ser pelo resultado do ensaio de módulo de deformação à compressão do traço T2, que apresentou uma confiabilidade de apenas 72,42% (ver Tabela III-24).

Os valores apresentados na Tabela III-24 referem-se aos cálculos realizados após a exclusão de alguns corpos-de-prova, cujos resultados se mostraram muito discrepantes – procedimento adotado somente no caso do ensaio de módulo de deformação à compressão. Os corpos-de-prova excluídos foram os de número 10, 11, 19 e 21 no caso do traço T1, e os de número 11, 12, 19 e 21 para o traço T2 (vide valores detalhados e curvas tensão x deformação no ANEXO D, item D.3). Isto explica a não coincidência entre o número de corpos-de-prova real apresentado na Tabela III-24 e os números que se encontram na Tabela III-2.

Além da exclusão dos corpos-de-prova mencionados, outras medidas se fizeram necessárias para que os cálculos do módulo de deformação para este formato de corpo-de-prova fossem realizados. Para ambos os traços, no caso do módulo à compressão com os relógios comparadores, observou-se que o trecho inicial da curva tensão-deformação apresentava deformações exageradas (ANEXO D, item D.3). Acredita-se que esta deformação excessiva decorra, provavelmente, de uma acomodação da placa apoiada sobre o corpo-de-prova (Figura III-8). Com base nesta observação, descartaram-se os dois primeiros pares tensão/deformação das curvas, referentes aos níveis de carregamento de 0% e 10% da carga de ruptura prevista. Por este motivo, não foi possível, neste caso, calcular o módulo à compressão inicial e o módulo secante a 10% e 50% da carga de ruptura do corpo-de-prova, tendo-se calculado somente o módulo tangente a 50% da carga de ruptura.

Para o traço T2, as curvas tensão-deformação obtidas com o uso dos extensômetros apresentaram uma tendência logarítmica, o que leva a um valor de módulo tangente inicial infinito (ANEXO D, item D.3.2). Entretanto, observou-se que, tomando-se os pontos somente até o nível de tensão de 50% da carga de ruptura, seria possível interpolá-los com um polinômio de segundo grau, havendo

grande coincidência com o trecho inicial da curva logarítmica. Este foi o procedimento adotado para possibilitar o cálculo do módulo tangente inicial para este traço. Os módulos tangente a 50% e secante a 10% e 50% da carga de ruptura, por sua vez, foram calculados com base nas curvas logarítmicas.

Tabela III-24 - Testes de suficiência, nível de significância e semi-amplitude para o cubo, para os traços T1 e T2.

| | | Ultrassom | Resistência à compressão* | Módulo à compressão (inicial) |
|--|---------------|-----------|---------------------------|-------------------------------|
| Teste da suficiência do número de corpos-de-prova | | | | |
| TRAÇO T1 | n nec. | 1 | 17 | 12 |
| | n real | 23 | 3 | 8 |
| | suficiência | OK | NÃO OK | NÃO OK |
| TRAÇO T2 | n nec. | 2 | 7 | 31 |
| | n real | 18 | 5 | 7 |
| | suficiência | OK | NÃO OK | NÃO OK |
| Determinação do nível de significância | | | | |
| TRAÇO T1 | $z(\alpha/2)$ | 24,80 | 1,81 | 1,86 |
| | α | 0,00% | 7,02% | 7,88% |
| | $1-\alpha$ | 100,00% | 92,98% | 92,12% |
| TRAÇO T2 | $z(\alpha/2)$ | 8,60 | 2,36 | 1,09 |
| | α | 0,00% | 1,82% | 27,58% |
| | $1-\alpha$ | 100,00% | 98,18% | 72,42% |
| Determinação de e_0 sendo $\alpha = 5\%$ | | | | |
| TRAÇO T1 | e_0 (GPa)* | 0,13 | 1,74 | 1,70 |
| | % média | 0,79% | 11,40% | 10,54% |
| TRAÇO T2 | e_0 (GPa)* | 0,08 | 0,20 | 0,75 |
| | % média | 2,28% | 8,29% | 18,06% |
| * Os valores referentes à resistência estão em MPa | | | | |

Comparando-se os valores de módulo de deformação obtidos pelo ultrassom e pela compressão inicial (Tabela III-25 e Figura III-24), verifica-se que ambos podem ser considerados iguais, para os dois traços.

Tabela III-25 - Comparação entre os valores de módulo pelo ultrassom e à compressão inicial obtidos para o cubo, para os traços T1 e T2.

| | | Ultrassom | Módulo à compressão (inicial) | Δ |
|----------|------------------|-----------|---|----------|
| TRAÇO T1 | média (GPa) | 16,77 | 16,08 | 0,69 |
| | desv. pad. (GPa) | 0,22 | 2,45 | 2,44 |
| | coef. var. (%) | 1,30% | 15,21% | - |
| | dmédio | 0,69 | Conclusão: como $ t < t_{crit}$, aceito H_0 . Logo, as médias são iguais. | |
| | sd | 2,44 | | |
| | n | 8 | | |
| | t | 0,80 | | |
| | Graus de lib. | 7 | | |
| | tcrit. | 2,36 | | |
| TRAÇO T2 | média (GPa) | 3,65 | 4,13 | -0,48 |
| | desv. pad. (GPa) | 0,10 | 1,01 | 1,02 |
| | coef. var. (%) | 2,62% | 24,38% | - |
| | dmédio | -0,48 | Conclusão: como $ t < t_{crit}$, aceito H_0 . Logo, as médias são iguais. | |
| | sd | 1,02 | | |
| | n | 7 | | |
| | t | -1,25 | | |
| | Graus de lib. | 6 | | |
| | tcrit. | 2,45 | | |

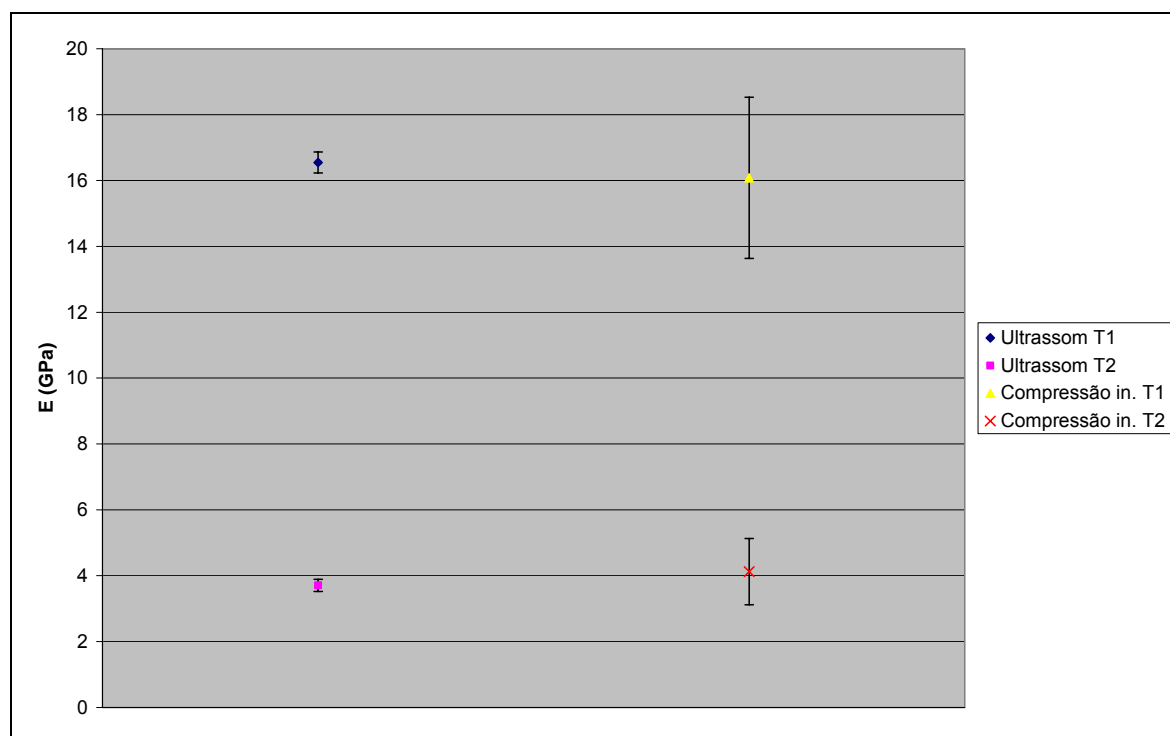


Figura III-24 - Apresentação dos resultados de módulo de deformação por diferentes ensaios, para o cubo, para os traços T1 e T2.

Ao se comparar os valores de módulo de deformação à compressão tangente a 50% da carga de ruptura prevista, percebe-se, para o traço T1, que ambos os valores se encontram muito próximos e podem ser considerados iguais (Tabela III-26 e Figura III-25). No caso do traço T2, esta igualdade já não se verifica, segundo o teste estatístico. Isto provavelmente se deve à tendência logarítmica das curvas tensão-deformação obtidas para o extensômetro para este traço, que é distinta da tendência polinomial observada para os relógios comparadores (ANEXO D, item D.3.2).

Tabela III-26 - Comparação entre os valores de módulo de deformação à compressão tangente a 50%, obtidos com diferentes tipos de medidores de deslocamento, para o cubo, para os traços T1 e T2.

| | | Módulo tg50% extensômetro | Módulo tg50% relógios comp. | Δ |
|-------------|------------------|------------------------------|--|----------|
| TRAÇO T1 | média (GPa) | 6,41 | 6,11 | 0,29 |
| | desv. pad. (GPa) | 0,33 | 0,37 | 0,55 |
| | coef. var. (%) | 5,10% | 6,03% | - |
| | dmédio | 0,29 | <i>Conclusão: como $t < t_{crit}$, aceito H_0. Logo, as médias são iguais.</i> | |
| | sd | 0,55 | | |
| | n | 6 | | |
| | t | 1,31 | | |
| | Graus de lib. | 5 | | |
| tcrit. | 2,57 | | | |
| TRAÇO T2 | média (GPa) | 1,10 | 0,54 | 0,56 |
| | desv. pad. (GPa) | 0,25 | 0,05 | 0,23 |
| | coef. var. (%) | 22,29% | 8,35% | |
| | dmédio | 0,56 | <i>Conclusão: como $t > t_{crit}$, rejeito H_0. Logo, as médias não são iguais.</i> | |
| | sd | 0,23 | | |
| | n | 6 | | |
| | t | 5,92 | | |
| | Graus de lib. | 5 | | |
| tcrit. | 2,57 | | | |

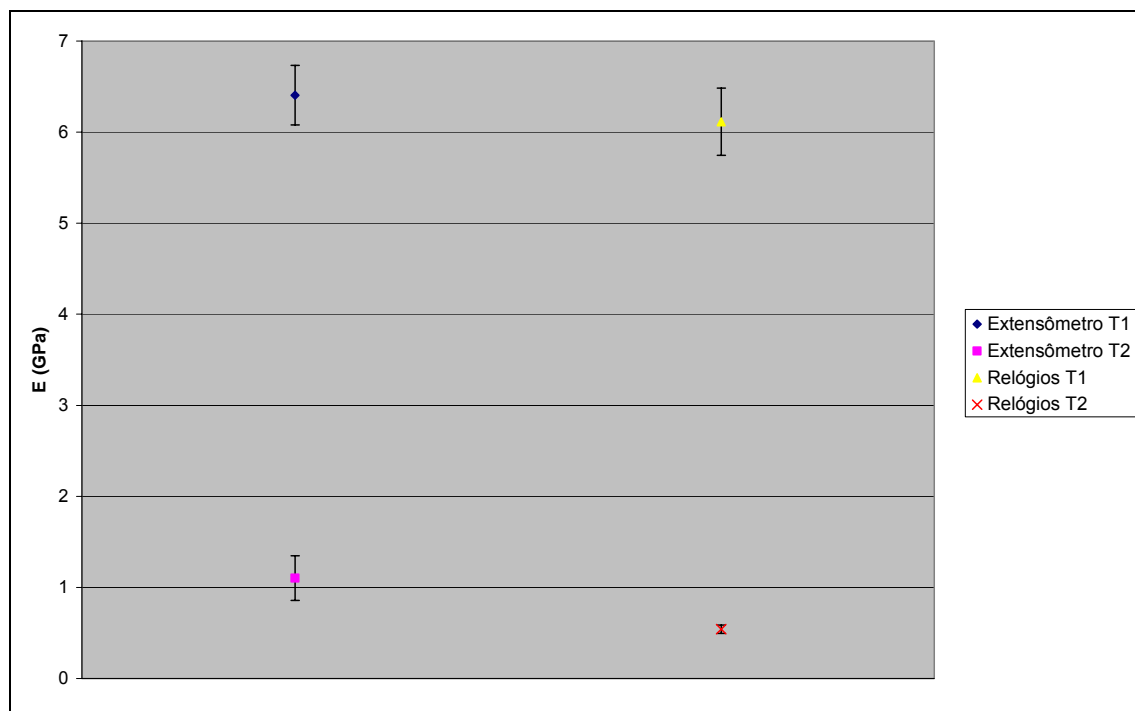


Figura III-25 - Apresentação dos resultados de módulo de deformação tangente a 50% por diferentes medidores de deslocamento para o cubo, para os traços T1 e T2.

III.4.2.4. Placa

Os resultados obtidos para a placa encontram-se no ANEXO D, item D.4. A síntese, por sua vez, está apresentada na Tabela III-27. O método de cálculo do módulo de deformação, para este ensaio, encontra-se explicado no primeiro relatório parcial enviado à FAPESP, item 1.7.2.

Tabela III-27 – Resultados de resistência à tração na flexão e módulo de deformação para a placa, para os traços T1 e T2.

| | | Ultrassom (D1) | Ultrassom (D2) | Módulo à tração na flexão (5%/30%) | Módulo à tração na flexão (10%/50%) | Resistência à tração na flexão* |
|----------|-------------------|----------------|----------------|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| TRAÇO T1 | média (GPa)* | 11,34 | 10,75 | 2,75 | 3,35 | 2,11 |
| | desv. pad. (GPa)* | 0,24 | 0,37 | 0,89 | 1,03 | 0,02 |
| | coef. var. (%) | 2,10% | 3,42% | 32,38% | 30,69% | 0,78% |
| TRAÇO T2 | média (GPa)* | 4,87 | 4,69 | 1,40 | 1,39 | 0,78 |
| | desv. pad. (GPa)* | 0,31 | 0,22 | 0,14 | 0,26 | 0,08 |
| | coef. var. (%) | 6,43% | 4,76% | 10,27% | 18,53% | 9,72% |

* Os valores referentes à resistência estão em MPa

Em relação à suficiência do número de corpos-de-prova, esta não se verificou para os ensaios de módulo estático para ambos os traços, sendo que para o traço mais fraco, observou-se a insuficiência também para o ensaio de resistência à tração na flexão (Tabela III-28). Para o traço T2, foram empregados somente quatro corpos-de-prova para os ensaios de módulo à tração na flexão, pois o resultado do primeiro corpo-de-prova se mostrou excepcionalmente incoerente e, por isso, foi excluído da análise – vide ANEXO D, item D.4.2. Os níveis de significância observados foram mais insatisfatórios para o traço T1, que apresentou maior variabilidade nos ensaios de módulo estático.

Tabela III-28 - Testes de suficiência, nível de significância e semi-amplitude para a placa, para os traços T1 e T2.

| | | Ultrassom (D1) | Ultrassom (D2) | Módulo à tração na flexão (5%/30%) | Módulo à tração na flexão (10%/50%) | Resistência à tração na flexão* |
|---|---------------|----------------|----------------|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Teste da suficiência do número de corpos-de-prova | | | | | | |
| TRAÇO T1 | n nec. | 1 | 1 | 81 | 73 | 1 |
| | n real | 8 | 8 | 5 | 5 | 3 |
| | suficiência | OK | OK | NÃO OK! | NÃO OK! | OK |
| TRAÇO T2 | n nec. | 3 | 2 | 11 | 35 | 18 |
| | n real | 8 | 8 | 4 | 4 | 3 |
| | suficiência | OK | OK | NÃO OK! | NÃO OK! | NÃO OK! |
| Determinação do nível de significância | | | | | | |
| TRAÇO T1 | $z(\alpha/2)$ | 13,44 | 8,27 | 0,69 | 0,73 | 22,11 |
| | α | 0,00% | 0,00% | 49,02% | 46,54% | 0,00% |
| | $1-\alpha$ | 100,00% | 100,00% | 50,98% | 53,46% | 100,00% |
| TRAÇO T2 | $z(\alpha/2)$ | 4,40 | 5,94 | 1,95 | 1,08 | 1,78 |
| | α | 0,00% | 0,00% | 5,12% | 28,02% | 7,50% |
| | $1-\alpha$ | 100,00% | 100,00% | 94,88% | 71,98% | 92,50% |
| Determinação de e_0 sendo $\alpha = 5\%$ | | | | | | |
| TRAÇO T1 | e_0 (GPa)* | 0,17 | 0,25 | 0,78 | 0,90 | 0,02 |
| | % média | 1,46% | 2,37% | 28,38% | 26,90% | 0,89% |
| TRAÇO T2 | e_0 (GPa)* | 0,22 | 0,15 | 0,14 | 0,25 | 0,09 |
| | % média | 4,45% | 3,30% | 10,06% | 18,16% | 11,00% |

* Os valores referentes à resistência estão em MPa

Na Tabela III-29, testa-se a igualdade entre os valores de módulo pelo ultrassom medidos em diferentes direções, comparação ilustrada também pela Figura III-26. A direção D1 refere-se à medida ao longo do comprimento e D2 representa a medida ao longo da espessura do corpo-de-prova, que foi escolhida por ser a dimensão que será submetida ao ensaio de módulo à tração na flexão. Os valores obtidos para o traço T1 não podem ser considerados iguais (conforme

o teste estatístico), embora a diferença seja somente de 0,59GPa. Para o traço T2, o teste indicou corretamente a igualdade entre os valores.

Tabela III-29 - Comparação entre os valores de módulo de deformação pelo ultrassom medidos em diferentes direções para a placa, para os traços T1 e T2.

| | | Ultrassom (D1) | Ultrassom (D2) | Δ |
|----------|------------------|----------------|--|----------|
| TRAÇO T1 | média (GPa) | 11,34 | 10,75 | 0,59 |
| | desv. pad. (GPa) | 0,24 | 0,37 | 0,35 |
| | coef. var. (%) | 2,10% | 3,42% | |
| | dmédio | 0,59 | <i>Conclusão: como $t > t_{crit}$, rejeito H_0. Logo, as médias não são iguais.</i> | |
| | sd | 0,35 | | |
| | n | 8 | | |
| | t | 4,74 | | |
| | Graus de lib. | 7 | | |
| tcrit. | 2,36 | | | |
| TRAÇO T2 | média (GPa) | 4,87 | 4,69 | 0,18 |
| | desv. pad. (GPa) | 0,31 | 0,22 | 0,35 |
| | coef. var. (%) | 6,43% | 4,76% | - |
| | dmédio | 0,18 | <i>Conclusão: como $t < t_{crit}$, aceito H_0. Logo, as médias são iguais.</i> | |
| | sd | 0,35 | | |
| | n | 8 | | |
| | t | 1,45 | | |
| | Graus de lib. | 7 | | |
| tcrit. | 2,36 | | | |

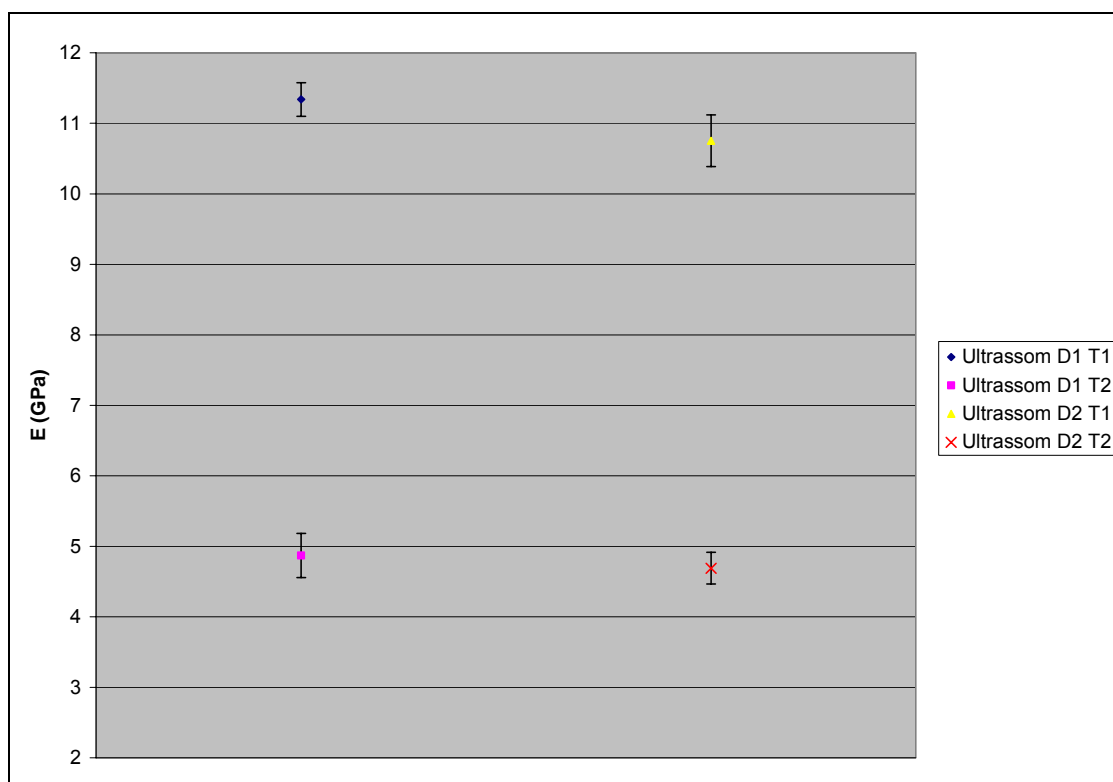


Figura III-26 - Valores de módulo de deformação obtidos em diferentes direções de medida para a placa, para os traços T1 e T2.

III.4.2.5. Prisma

Os resultados obtidos pelos diferentes ensaios encontram-se na Tabela III-30, sendo que os resultados de módulo de deformação também estão ilustrados pela Figura III-27. Os resultados detalhados encontram-se no ANEXO D, item D.5.

Tabela III-30 – Resultados de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de deformação para o prisma, para os traços T1 e T2.

| | | Ultrassom (D1, OP1) | Ultrassom (D2) | Ultrassom (D1, OP2) | Módulo à compressão (inicial) | Módulo à compressão (tg50%) | Módulo à compressão (corda 10%/50%) | Resistência à compressão* | Resistência à tração na flexão* |
|----------|-------------------|---------------------|----------------|---------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| TRAÇO T1 | média (GPa)* | 14,06 | 12,78 | 14,16 | 16,49 | 11,14 | 13,61 | 11,79 | 2,73 |
| | desv. pad. (GPa)* | 0,74 | 0,33 | 0,66 | 4,31 | 3,01 | 3,11 | 0,22 | 0,21 |
| | coef. var. (%) | 5,25% | 2,61% | 4,64% | 26,13% | 27,04% | 22,82% | 1,86% | 7,76% |
| TRAÇO T2 | média (GPa)* | 4,99 | 4,94 | - | 4,33 | 2,84 | 3,30 | 2,92 | 0,92 |
| | desv. pad. (GPa)* | 0,25 | 0,28 | | 0,79 | 0,45 | 0,63 | 0,19 | 0,09 |
| | coef. var. (%) | 4,98% | 5,60% | | 18,23% | 15,97% | 19,07% | 6,55% | 9,30% |

* Os valores referentes à resistência estão em MPa

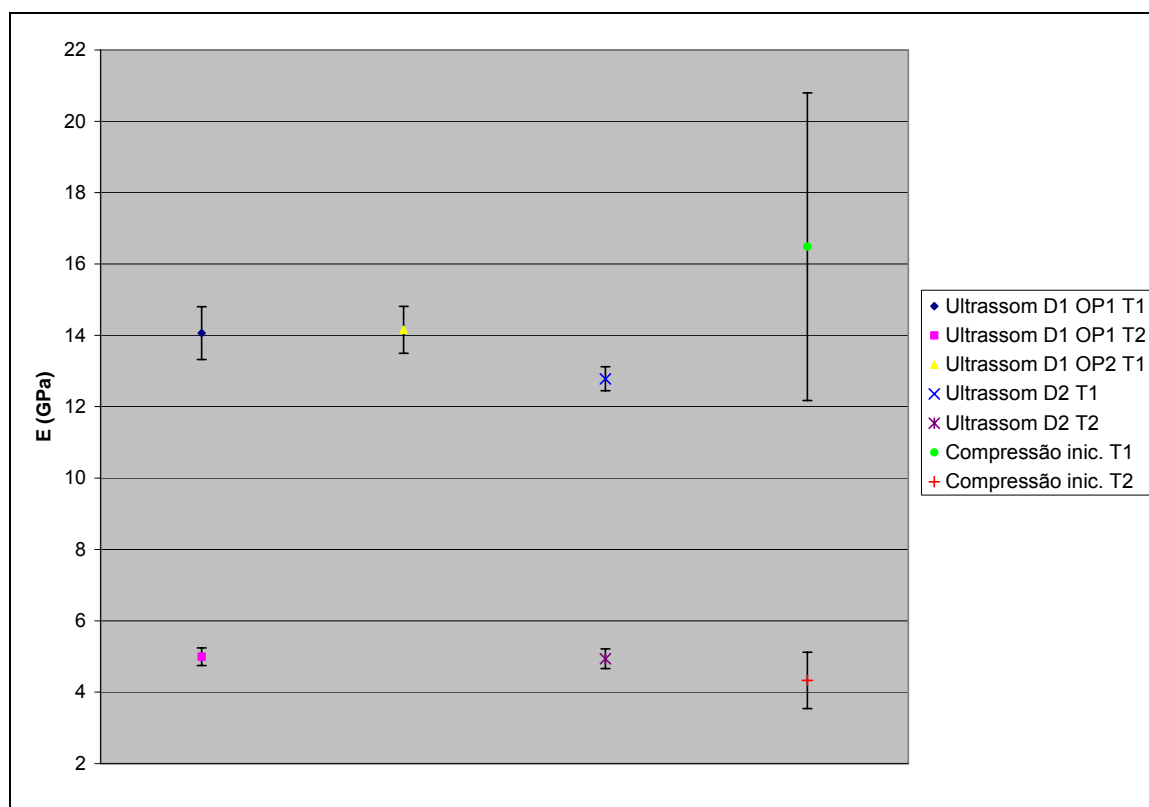


Figura III-27 - Apresentação dos resultados de módulo de deformação por diferentes ensaios para o prisma, para os traços T1 e T2.

No que diz respeito à suficiência do número de corpos de prova, somente para o módulo à compressão inicial a quantidade de corpos-de-prova se mostrou

insuficiente, para ambos os traços (Tabela III-31). Apesar disso, os níveis de confiança obtidos (79,94% e 78,14%) não podem ser considerados baixos. Ainda na Tabela III-31, encontram-se os níveis de significância obtidos sob as condições disponíveis e também os valores de semi-amplitude dos intervalos de confiança. Os valores de módulo tangente a 50% e módulo corda (10%/50%) não foram testados quanto à suficiência da quantidade de corpos-de-prova, pelo mesmo motivo anteriormente mencionado para o cilindro (item III.4.2.2).

Tabela III-31 - Testes de suficiência, nível de significância e semi-amplitude para o prisma, para os traços T1 e T2.

| | | Ultrassom (D1) | Ultrassom (D2) | Módulo à compressão (inicial) | Resistência à compressão* | Resistência à tração na flexão* |
|---|---------------|----------------|----------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Teste da suficiência do número de corpos-de-prova | | | | | | |
| TRAÇO T1 | n nec. | 2 | 1 | 30 | 1 | 4 |
| | n real | 21 | 21 | 11 | 4 | 8 |
| | suficiência | OK | OK | NÃO OK! | OK | OK |
| TRAÇO T2 | n nec. | 2 | 2 | 12 | 4 | 5 |
| | n real | 21 | 21 | 9 | 5 | 8 |
| | suficiência | OK | OK | NÃO OK | OK | OK |
| Determinação do nível de significância | | | | | | |
| TRAÇO T1 | $z(\alpha/2)$ | 8,73 | 17,54 | 1,28 | 10,74 | 3,65 |
| | α | 0,00% | 0,00% | 20,06% | 0,00% | 0,02% |
| | $1-\alpha$ | 100,00% | 100,00% | 79,94% | 100,00% | 99,98% |
| TRAÇO T2 | $z(\alpha/2)$ | 9,20 | 8,18 | 1,65 | 3,41 | 3,04 |
| | α | 0,00% | 0,00% | 21,86% | 0,06% | 0,24% |
| | $1-\alpha$ | 100,00% | 100,00% | 78,14% | 99,94% | 99,76% |
| Determinação de e_0 sendo $\alpha = 5\%$ | | | | | | |
| TRAÇO T1 | e_0 (GPa)* | 0,32 | 0,14 | 2,55 | 0,22 | 0,15 |
| | % média | 2,24% | 1,12% | 15,44% | 1,83% | 5,38% |
| TRAÇO T2 | e_0 (GPa)* | 0,11 | 0,12 | 0,52 | 0,17 | 0,06 |
| | % média | 2,13% | 2,39% | 11,91% | 5,74% | 6,45% |

* Os valores referentes à resistência estão em MPa

Comparando os valores de módulo pelo ultrassom obtidos por operadores distintos, teste realizado somente para o traço T1, não se observa diferença entre os resultados, conforme se observa Tabela III-32 e também na Figura III-27. Portanto, pode-se afirmar, neste caso, que o operador não exerce influência sobre esta medida.

Tabela III-32 - Comparação entre os valores de módulo de deformação pelo ultrassom obtidos por diferentes operadores para o prisma de traço T1.

| | Ultrassom (OP1) | Ultrassom (OP2) | Δ |
|------------------|-----------------|---|----------|
| média (GPa) | 14,06 | 14,16 | -0,09 |
| desv. pad. (GPa) | 0,74 | 0,66 | 0,34 |
| coef. var. (%) | 5,25% | 4,64% | - |
| dmédio | -0,09 | <i>Conclusão: como $t < t_{crit}$, aceito H_0. Logo, as médias são iguais.</i> | |
| sd | 0,34 | | |
| n | 21 | | |
| t | -1,27 | | |
| Graus de lib. | 20 | | |
| tcrit. | 2,09 | | |

Analisando a influência da direção sobre os resultados do módulo pelo ultrassom (Tabela III-33), sendo D1 a medida do módulo ao longo do comprimento e D2 ao longo da espessura, conclui-se que os módulos de diferentes direções não podem ser considerados iguais para o traço T1, sendo a diferença de 1,28GPa não desprezível. Entretanto, para o traço T2, se observa que ambos os valores praticamente coincidem.

Tabela III-33 - Comparação entre os valores de módulo de deformação pelo ultrassom medidos em diferentes direções para o prisma.

| | | Ultrassom (D1) | Ultrassom (D2) | Δ |
|----------|------------------|----------------|--|----------|
| TRAÇO T1 | média (GPa) | 14,06 | 12,78 | 1,28 |
| | desv. pad. (GPa) | 0,74 | 0,33 | 0,68 |
| | coef. var. (%) | 5,25% | 2,61% | - |
| | dmédio | 1,28 | <i>Conclusão: como $t > t_{crit}$, rejeito H_0. Logo, as médias não são iguais.</i> | |
| | sd | 0,68 | | |
| | n | 21 | | |
| | t | 8,56 | | |
| | Graus de lib. | 20 | | |
| tcrit. | 2,09 | | | |
| TRAÇO T2 | média (GPa) | 4,99 | 4,94 | 0,06 |
| | desv. pad. (GPa) | 0,25 | 0,28 | 0,16 |
| | coef. var. (%) | 4,98% | 5,60% | - |
| | dmédio | 0,06 | <i>Conclusão: como $t < t_{crit}$, aceito H_0. Logo, as médias são iguais.</i> | |
| | sd | 0,16 | | |
| | n | 21 | | |
| | t | 1,67 | | |
| | Graus de lib. | 20 | | |
| tcrit. | 2,09 | | | |

No que diz respeito à comparação entre o módulo pelo ultrassom e pela compressão inicial, foram feitas duas análises para o traço T1. A primeira, análise “A”, inclui todos os corpos-de-prova (vide ANEXO D, item D.5.1), enquanto a análise “B” exclui os corpos-de-prova que se deformaram muito menos do que os outros, o que pode indicar algum erro nas medidas ou mesmo alguma anomalia dos corpos-de-prova: CP 15, CP 16-2, CP 19-1 e CP 19-2. A seguir, será apresentada somente a análise “B” (Tabela III-34), que não considera as grandes variabilidades introduzidas pelo grupo de corpos-de-prova mencionado acima. No caso do traço T2, este procedimento não foi necessário.

Tabela III-34 - Comparação entre os valores de módulo pelo ultrassom e à compressão inicial obtidos para o prisma, para os traços T1 e T2.

| | | Ultrassom (D2) | Módulo à compressão (inicial) | Δ |
|----------|------------------|----------------|---|----------|
| TRAÇO T1 | média (GPa) | 12,83 | 14,05 | -1,22 |
| | desv. pad. (GPa) | 0,25 | 2,06 | 2,15 |
| | coef. var. (%) | 1,92% | 14,64% | - |
| | dmédio | -1,22 | <i>Conclusão: como $t < t_{crit}$, aceito H_0. Logo, as médias são iguais.</i> | |
| | sd | 2,15 | | |
| | n | 7 | | |
| | t | -1,50 | | |
| | Graus de lib. | 6 | | |
| tcrit. | 2,45 | | | |
| TRAÇO T2 | média (GPa) | 4,91 | 4,33 | 0,58 |
| | desv. pad. (GPa) | 0,22 | 0,79 | 0,96 |
| | coef. var. (%) | 0,05 | 0,18 | - |
| | dmédio | 0,58 | <i>Conclusão: como $t < t_{crit}$, aceito H_0. Logo, as médias são iguais.</i> | |
| | sd | 0,96 | | |
| | n | 9 | | |
| | t | 1,81 | | |
| | Graus de lib. | 8 | | |
| tcrit. | 2,31 | | | |

Embora, para ambos os traços, o teste conclua que os valores de módulo estático e dinâmico possam ser considerados iguais, nota-se que, no caso do traço T1, existe uma diferença absoluta de 1,22GPa entre ambos os valores. Observaram-se, anteriormente, casos em que os valores comparados eram mais próximos e foram considerados diferentes. Este fato se deve, novamente, ao tipo de método estatístico adotado, discutida no ANEXO A.

III.4.3. Análise da influência do traço

III.4.3.1. Resistência à compressão

Como se pode notar na Tabela III-9 e na Figura III-17, o ensaio consegue diferenciar de maneira satisfatória e coerente os dois traços. Percebe-se que a variabilidade, exceto pelos valores do prisma, não é muito diferente entre os traços T1 e T2.

III.4.3.2. Resistência à tração na flexão

Novamente, observa-se que o ensaio diferencia os dois traços (vide Tabela III-11 e na Figura III-19). Ainda será observada, como mencionado no item III.2.2, a questão da sensibilidade da célula de carga.

III.4.3.3. Módulo de deformação pelo ultrassom

Neste caso, também foram distinguidos ambos os traços, conforme mostram a Tabela III-13 e a Figura III-20. Tanto para o traço T1 como para o T2, o formato exerceu influência sobre os resultados. A variabilidade do traço T2 é ligeiramente maior do que a obtida para o traço T1.

III.4.3.4. Módulo de deformação à compressão

A distinção entre os traços é nítida, como se observa na Tabela III-13 e na Figura III-21.

III.4.3.5. Módulo de deformação pela frequência de ressonância

Como é possível notar na Tabela III-35 e na Figura III-22, os valores são coerentes e diferenciam ambos os traços. Não houve, praticamente, diferenças entre a variabilidade resultante em cada um dos traços.

Tabela III-35 - Comparação entre valores de módulo pela frequência de ressonância obtidos para diferentes traços.

| | Traço T1 | Traço T2 |
|------------------|-----------------|-----------------|
| E médio (GPa) | 11,47 | 6,51 |
| desv. pad. (GPa) | 0,63 | 0,33 |
| coef. var. (%) | 5,54% | 5,08% |

III.4.3.6. Módulo de deformação à tração na flexão

Novamente, é possível notar uma diferença nítida entre ambos os traços, como se observa na Tabela III-36 e na Figura III-28. Contraditoriamente, o traço mais fraco, que normalmente apresenta níveis maiores de coeficiente de variação, neste caso apresentou uma variabilidade menor do que o traço T1. Isto permite concluir que esta variabilidade observada não diz respeito à variabilidade intrínseca do traço, e sim à variação pertencente ao método de ensaio.

Tabela III-36 - Comparação entre valores de módulo à tração na flexão com corpos-de-prova em forma de placa, obtidos para os traços T1 e T2.

| | Traço T1 | | Traço T2 | |
|------------------|----------|-----------|----------|-----------|
| | E 5%/30% | E 10%/50% | E 5%/30% | E 10%/50% |
| média (GPa) | 2,75 | 3,35 | 1,40 | 1,39 |
| desv. pad. (GPa) | 0,89 | 1,03 | 0,14 | 0,26 |
| coef. var. | 32,38% | 30,69% | 10,27% | 18,53% |

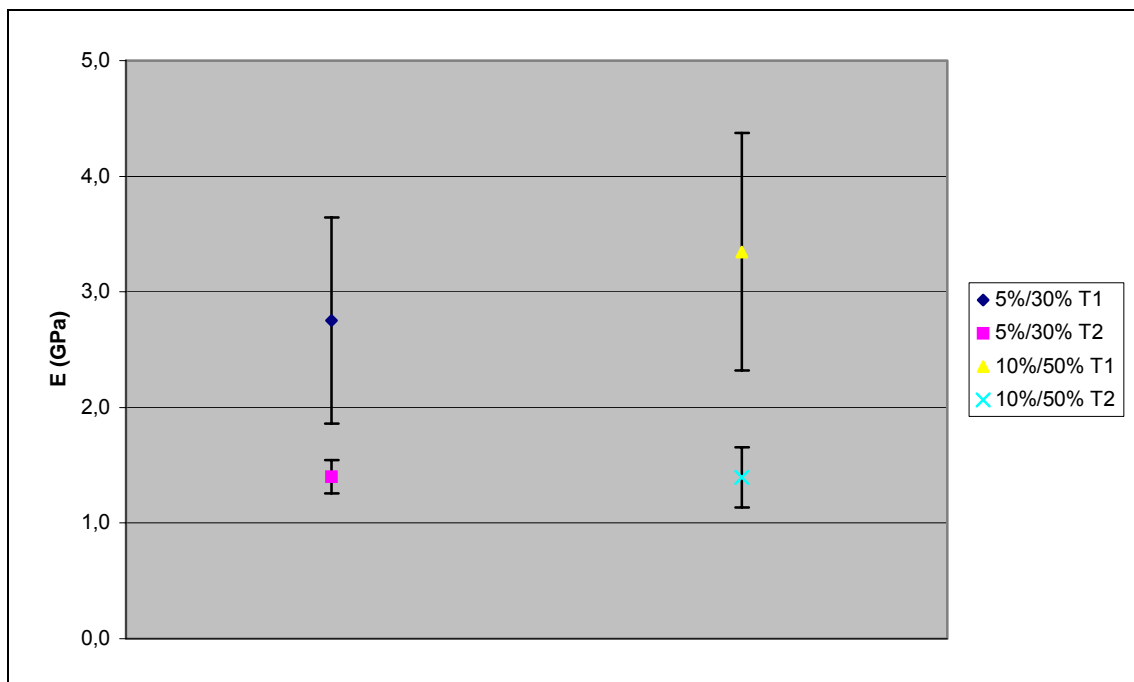


Figura III-28 - Apresentação dos resultados de módulo de deformação à tração na flexão para a placa, para os traços T1 e T2.

III.5. Considerações finais sobre o programa experimental e a análise dos resultados

Na Tabela III-37 e Tabela III-38 encontra-se uma síntese das observações que dizem respeito ao tipo de ensaio adotado para avaliação do módulo de deformação e ao formato de corpo-de-prova utilizado.

Na Tabela III-37, o coeficiente médio de variação do módulo foi obtido através do cálculo da média dos coeficientes médios de variação de cada par “formato de corpo-de-prova/traço”. O tempo médio de ensaio por corpo-de-prova foi calculado com base nos seguintes tempos parciais: preparação do corpo-de-prova (exceto capeamento), afixação ou montagem de dispositivos de medida e aplicação de carga, posicionamento na prensa ou no dispositivo de aplicação de frequência e duração do ensaio.

Tabela III-37 - Síntese das observações relativas ao tipo de ensaio adotado para avaliação do módulo de deformação.

| Ensaio | Coef. médio de variação do módulo | Resultado | Tempo de ensaio por CP | Vantagens | Desvantagens |
|---------------------------|-----------------------------------|--|---|---|---|
| À compressão | 16,75% | Curva tensão-deformação | T _{máx} : 17min T _{mín} : 8min | Fornecer a curva tensão-deformação; É o ensaio mais utilizado no Brasil (embora exista uma discordância entre as normas a serem adotadas). | Destrutivo; É necessário um posicionamento criterioso do instrumento de medida; Relógios comparadores não fornecem resultados consistentes; Equipamento de alto custo; Exige pessoal especializado; Tempo total de ensaio: longo; Não representa o esforço mais comum em argamassas |
| À tração na flexão | 21,33% | Curva tensão-deformação | T ~ 15min (inclusive o tempo para lixar o CP) | Fornecer a curva tensão-deformação; Representa o esforço mais comum em argamassas de revestimento. | Destrutivo; É necessário lixar previamente os corpos-de-prova; É necessário um posicionamento criterioso do instrumento de medida; Equipamento de alto custo; Exige pessoal especializado; Tempo total de ensaio: longo; Não é um ensaio difundido no Brasil. |
| Ultrassom | 4,33% | Valor numérico que corresponde ao módulo tangente inicial à compressão | T ~ 2min | Não destrutivo; Fácil execução; Simples montagem; Equipamento de baixo custo; Não exige pessoal especializado; Rápida execução; Adotado internacionalmente. | Fornecer somente o valor do módulo tangente inicial; Ainda é pouco utilizado no Brasil. |
| Frequência de ressonância | 5,31% | Valor numérico que corresponde ao módulo tangente inicial à compressão | T ~ 5min | Não destrutivo; Fácil execução; Simples montagem; Não exige pessoal especializado; Rápida execução; Adotado internacionalmente. | Fornecer somente o valor do módulo tangente inicial; Equipamento de alto custo; Não é um ensaio difundido no Brasil. |

Com base nas observações expostas na Tabela III-37, verifica-se que as vantagens dos ensaios dinâmicos de determinação do módulo de deformação prevalecem sobre os ensaios estáticos em praticamente todos os critérios adotados para avaliação dos métodos existentes, a não ser pelo fato que eles não fornecem a curva tensão-deformação. Entre os ensaios dinâmicos, o mais recomendado seria a determinação do módulo de deformação pelo ultrassom, por ser um ensaio de realização mais simples que o ensaio pela frequência de ressonância, além de não exigir equipamentos de alto custo.

Entretanto, há casos em que a determinação da curva tensão-deformação é necessária, situação em que os ensaios estáticos são os únicos aplicáveis. O ensaio à compressão possui a grande vantagem de ser bastante difundido no Brasil. Porém, o esforço de compressão não representa aquele ao qual as argamassas de revestimento são comumente submetidas. O ensaio à tração na flexão, por sua vez, representa uma situação de esforços mais próxima da real; no entanto, ele ainda não é difundido no Brasil, e sua execução é bastante dificultada pela necessidade de lixar os corpos-de-prova e de posicioná-los com grande exatidão na prensa. Ainda que este ensaio apresente as desvantagens citadas, aliadas a uma alta variabilidade dos seus resultados, ele não deve ser desconsiderado, devido à coerência dos esforços aplicados em relação às argamassas de revestimento aplicadas, devendo ser melhor investigado em pesquisas futuras.

Tabela III-38 - Síntese das observações relativas ao formato de corpo-de-prova adotado para avaliação do módulo de deformação.

| Formato do corpo-de-prova | Dimensões (cm) | Volume de argamassa/ CP (litros) | Coef. de variação médio | Aspectos relevantes |
|---------------------------|----------------|----------------------------------|--|---|
| Barra | 2,5x2,5x28,5 | 0,18 | MU: 5,63% MFR: 5,31% | Seu uso não é difundido no Brasil; Difícil moldagem; Muitas perdas na desmoldagem; Problemas de fissuração por elevada retração; Não permite ensaios de resistência mecânica; Frágil. |
| Cilindro | φ5x10 | 0,20 | MCE: 8,32% MU: 3,22% RC: 3,83% | Requer capeamento para ensaio à compressão; Muito difundido no Brasil; Menores níveis de variabilidade. |
| Cubo | 10x10x10 | 1,00 | MCE: 19,8% MU: 3,43% RC: 6,96% | Alto consumo de argamassa; Requer prensa com alta capacidade de carga; Resultados discrepantes (ANEXO D). |
| Placa | 2,5x7,5x20 | 0,38 | MU: 4,27% MTF: 21,3% RTF: 5,25% | Seu uso não é difundido no Brasil; É necessário lixar o corpo-de-prova, pois a face de moldagem fica em contato com a prensa; Representa condição bem próxima aos revestimentos reais de argamassa. |
| Prisma | 4x4x16 | 0,26 | MCE: 22,2% MU: 5,12% RC: 4,21% RTF: 8,53% | Uso muito difundido no Brasil; É o formato recomendado por grande parte das normas internacionais; Pode ser ensaiado à tração na flexão. |

De acordo com a síntese apresentada na Tabela III-38, verifica-se que o cilindro, apesar da necessidade de capeamento, é o corpo-de-prova mais indicado para execução dos ensaios, devido à baixa variabilidade de seus resultados. Em seguida, recomenda-se a utilização do prisma, pois além de ser o formato de corpo-de-prova mais adotado internacionalmente, ele representa uma situação mais próxima à configuração dos revestimentos aplicados de argamassa. Apesar do prisma, aparentemente, apresentar níveis de variabilidade de seus resultados maiores do que o cubo, vale ressaltar que os resultados apresentados na Tabela III-38 não consideram os corpos-de-prova excluídos (item III.4.2.3 e III.4.2.5), sendo que o número de corpos-de-prova excluídos da análise para o

cubo foi superior ao do prisma. Portanto, considerando ainda os problemas citados na Tabela III-38 para o corpo-de-prova cúbico, não se recomenda o seu uso.

No que diz respeito aos formatos menos difundidos na comunidade técnico-científica brasileira (barra e placa), é importante mencionar que, de todos os formatos testados, a placa é aquela que mais se aproxima dos revestimentos reais. Vale aqui a mesma conclusão relativa ao ensaio de módulo de deformação à tração na flexão: apesar da alta variabilidade dos seus resultados, seu uso não deve ser descartado, sendo necessário um estudo mais amplo sobre a metodologia de ensaio ao qual este formato é submetido. Já a barra, pelos vários inconvenientes apresentados na Tabela III-38, é um formato de corpo-de-prova cujo uso deve ser descartado.

Portanto, conclui-se que, para casos de simples caracterização das argamassas de base cimentícia, em que não é necessária a análise da curva tensão-deformação, o ensaio de módulo de deformação pelo ultrassom deve ser o utilizado. Quanto aos formatos de corpo-de-prova a serem utilizados, recomenda-se o cilindro, pela ampla utilização nos laboratórios brasileiros, entre outras razões já citadas; e o prisma, que, além das vantagens discutidas, permite a comparação com trabalhos científicos de outros países, tendo em vista que é o formato previsto pela maioria das normas internacionais.

No entanto, há casos em que a análise da curva tensão-deformação se faz necessária, como, por exemplo, em argamassas modificadas com polímeros. Godoy e Barros (1999) ilustram esta situação, por meio da análise de duas argamassas distintas. Observa-se, na Figura III-29, que a argamassa com aditivos apresenta uma capacidade de deformação muito maior do que a que não possui aditivos, sendo que os valores de módulo de deformação inicial para ambas as argamassas são muito próximos. Neste caso, o uso de métodos de ensaio estáticos para determinação do módulo de deformação se justifica, sendo indicado o ensaio de módulo de deformação à compressão, com extensômetros elétricos como medidores de deformação.

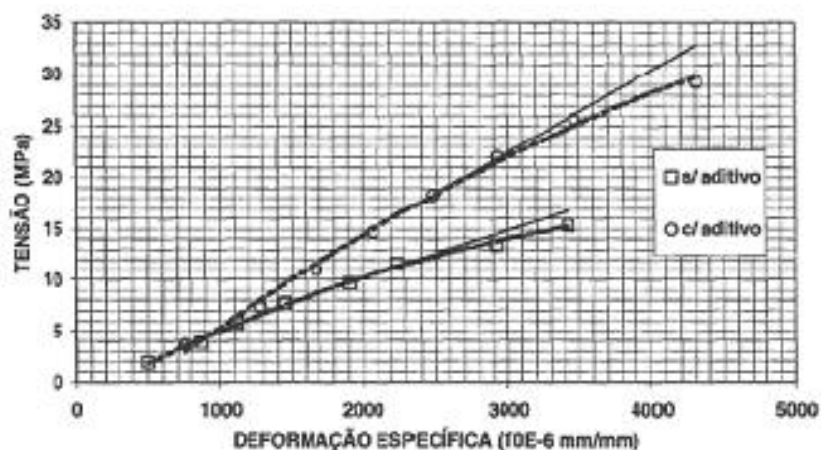


Figura III-29 - Análise comparativa da capacidade de deformação de duas argamassas (GODOY; BARROS, 1999).

III.6. Publicação científica

Nesta etapa do trabalho, também foi submetido um artigo para participação no 49º Congresso Brasileiro do Concreto, a ser realizado no período de 01/09 a 05/09/2007, em Bento Gonçalves (RS), cujo título é “Avaliação do módulo de deformação em materiais cimentícios: ensaios estáticos ou dinâmicos?”. Para este evento, focou-se na apresentação dos dados obtidos para o corpo-de-prova cilíndrico, pois foram os resultados que se mostraram mais consistentes e com menor variabilidade. O resumo foi aprovado pelo comitê do IBRACON e encontra-se no ANEXO G.

O artigo (ANEXO G) foi enviado no dia 27/04/2007 e encontra-se em processo de avaliação.

PARTE IV. Considerações finais

IV.1. Quanto aos objetivos a serem atingidos

O objetivo da pesquisa, inicialmente proposto foi o de avaliar os métodos de ensaio de determinação do módulo de deformação conjuntamente com os formatos de corpo-de-prova empregados, no que diz respeito à variabilidade, confiabilidade e repetibilidade dos resultados obtidos. Pelo programa experimental empreendido, pelos resultados obtidos e pela sua análise, anteriormente apresentada, acredita-se que tenha sido plenamente atingido. Observaram-se os

aspectos relativos tanto aos resultados de cada ensaio, como à facilidade ou dificuldade de realização dos mesmos, e identificaram-se também as situações em que cada um pode ser utilizado trazendo maior benefício à análise que se precisa realizar.

IV.2. Quanto às dificuldades encontradas ao longo do desenvolvimento da segunda etapa do trabalho

A primeira dificuldade que se encontrou nesta segunda etapa do trabalho foi o estabelecimento dos “*scripts*” de ensaio.

Primeiramente, houve a necessidade de se avaliar qual método de ensaio seria o mais adequado para a medição de cada tipo de módulo, o que levou às mudanças feitas no que diz respeito às referências normativas anteriormente estabelecidas (item III.1.2).

Decididos quais métodos seriam adotados, houve então dificuldades operacionais com a prensa, o que exigiu algumas adaptações nos “*scripts*”, inclusive com ajuda da assistência técnica da EMIC, para que o sistema pudesse aceitá-los e executá-los corretamente, e observando todos os aspectos dos métodos escolhidos. Como observado no item III.1.2, os “*scripts*” de ensaio resultantes encontram-se no ANEXO F.

No entanto, este estudo dos “*scripts*” consumiu um tempo considerável e levou ao atraso observado nos ensaios de caracterização mecânica, o que fez com que os corpos-de-prova fossem ensaiados aos 63 dias de idade (e não aos 28 dias, como estipulado anteriormente). Ainda assim, este estudo foi muito proveitoso, já que não houve problemas no momento da realização dos ensaios regidos por estes “*scripts*”.

Houve dificuldades também na fase de tratamento dos resultados da caracterização mecânica das argamassas. Observou-se uma grande variabilidade nos ensaios estáticos de determinação do módulo de deformação, o que dificultou os cálculos e também as comparações a serem estabelecidas. Em alguns casos, contornou-se parte do problema excluindo-se corpos-de-prova que apresentaram resultados muito discrepantes. Entretanto, houve casos também em que os dados, de tão variáveis, só puderam ser analisados mediante sua manipulação

por meio de exclusão de pontos da curva tensão-deformação. Este foi o caso de todos os dados de módulo do cubo de traço T2 e também os resultados dos relógios comparadores do cubo de traço T1. Outra dificuldade ocorreu na análise dos dados da barra de traço T2, pois havia um número muito reduzido de corpos-de-prova (apenas três), o que impossibilita quaisquer conclusões acerca dos resultados obtidos. Havia-se planejado a repetição destes ensaios e moldagens que apresentaram problemas; no entanto, no período após a primeira entrega do segundo relatório parcial de pesquisa (10/03/2007), houve um esforço intenso na elaboração do artigo do IBRACON, o que não permitiu esta volta ao laboratório. Além disso, durante este mesmo período, empreendeu-se muito tempo na finalização das análises dos resultados, bem como no tratamento supracitado dos dados dos corpos-de-prova cúbicos.

Um último problema encontrado foi com relação à compreensão do mecanismo de ensaio pela frequência de ressonância. Foi necessária a ajuda de um doutorando da Engenharia Mecânica da EPUSP para entender de que maneira o equipamento deveria ser montado e como ele funcionava. A busca de uma pessoa que entendesse do equipamento e que pudesse auxiliar no seu entendimento implicou no atraso observado na realização dos ensaios de módulo pela frequência de ressonância.

IV.3. Proposta de continuidade do trabalho

Ainda que os objetivos inicialmente propostos para este trabalho de pesquisa tenham sido completamente atingidos, acredita-se, pelo que foi vivenciado e apresentado neste relatório, que é necessária a ampliação da análise feita, de modo que se possa compreender plenamente o que estes resultados indicam sobre a repetibilidade e confiabilidade de cada ensaio, de modo a se chegar a uma conclusão consistente sobre cada um dos métodos, podendo-se, inclusive propor um só método a ser utilizado pela comunidade técnica e científica, de modo a se ter maior coerência entre as pesquisas realizadas.

Para que a avaliação dos métodos de ensaio abordados no presente trabalho seja completa, é necessário um estudo sobre o significado físico do

módulo de deformação fornecido por cada um deles, buscando, inclusive, a sua relação com variáveis de projeto. Para isso, propõe-se uma nova revisão bibliográfica sobre o assunto, com enfoque teórico.

Além disso, acredita-se que se deva investigar, ainda, a influência do teor de ar incorporado e da adição de polímeros nos resultados e na variabilidade dos ensaios. Segundo Godoy e Barros (1999), a adição de polímeros pode mudar o comportamento de deformação das argamassas (item III.5). Portanto, em trabalhos futuros deve-se buscar verificar este comportamento em argamassas com polímeros e também observar se a adição de ar incorporado segue a mesma tendência.

Tendo em vista essas necessidades de pesquisa identificadas pela pesquisadora, propõe-se a continuidade da bolsa de Iniciação Científica, como forma de melhor investigar alguns desses temas anteriormente apresentados.

Para isto, propõe-se como continuidade do trabalho, o estudo de três argamassas (5%, 15% e 30% de ar incorporado), a partir do traço T1, em corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos, pois estes foram os formatos que, entre os ensaios estáticos, apresentaram os melhores resultados (item III.5). Adotando-se os mesmos formatos e dosagem, serão ensaiadas argamassas com três teores de polímero, sendo que tanto os teores quanto o tipo de polímero a serem utilizados serão definidos com base em uma revisão bibliográfica inicial sobre o tema.

A proposta do programa experimental a ser seguido na próxima etapa do trabalho, caso a prorrogação da bolsa seja concedida, encontra-se na Tabela IV-1. O cronograma de realização das atividades propostas encontra-se na Tabela IV-2.

Tabela IV-1 - Proposta de programa experimental para verificação da influência do teor de ar incorporado e da adição de polímero sobre os resultados dos ensaios de caracterização mecânica das argamassas.

| Traço | Teor de ar incorporado/ polímero | Formato de corpo de prova | Ensaio de caracterização mecânica no estado endurecido | Referências normativas | Número de corpos-de-prova por teor de ar incorporado/ polímero | |
|-------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|--|--|--|--|
| T1 1:0,5:4,5 | 5% 15% 30% | prisma (4x4x16cm) | Resistência à tração na flexão | BS EN 1015-11 (1999) | 15 | |
| | | | Resistência à compressão | BS EN 1015-11 (1999) | | |
| | | | Módulo de deformação estático pelo extensômetro | adaptação da BS EN 1015-11 (1999) e da NBR 8522 (2003) (ANEXO B) | | |
| | | | | Módulo de deformação pelo ultrassom | Procedimento descrito no ANEXO B | |
| | 3 diferentes teores de polímero | cilindro (ϕ 5x10cm) | Resistência à compressão | adaptação da BS EN 1015-11 (1999) | 15 | |
| | | | Módulo de deformação estático pelo extensômetro | adaptação da BS EN 1015-11 (1999) e da NBR 8522 (2003) (ANEXO B) | | |
| Módulo de deformação pelo ultrassom | | | Procedimento descrito no ANEXO B | | | |

Paralelamente à nova programação proposta, deverão ser também realizadas as atividades referentes à participação no 49º Congresso Brasileiro do Concreto, como a preparação da apresentação, no caso da aceitação do artigo. Pretende-se também submeter artigos com os resultados do trabalho a revistas como a E-MAT, Técnica, à própria revista do IBRACON, e também a outros congressos como o ENTAC, que será realizado no ano de 2008.

Tabela IV-2 - Cronograma para realização das atividades subsequentes.

| Atividade | mai/07 | jun/07 | jul/07 | ago/07 | set/07 | out/07 | nov/07 | dez/07 | jan/08 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Revisão bibliográfica - ar incorporado e polímeros | | | | | | | | | |
| Moldagem dos corpos-de-prova | | | | | | | | | |
| Revisão bibliográfica - significado físico dos tipos de módulo de deformação | | | | | | | | | |
| Realização dos ensaios | | | | | | | | | |
| IBRACON - Congresso | | | | | | | | | |
| Análise estatística dos resultados | | | | | | | | | |
| Elaboração do relatório final | | | | | | | | | |

Alocou-se a moldagem dos corpos-de-prova em julho, para que haja tempo suficiente para realização da revisão bibliográfica sobre a presença de ar incorporado e polímeros nas argamassas. Além disso, este é o período em que a pesquisadora estará em férias acadêmicas, podendo se dedicar mais intensamente à iniciação científica. Para que os corpos-de-prova sejam ensaiados aos 63 dias de idade, os ensaios foram alocados no mês de setembro. A revisão

bibliográfica sobre o significado físico de cada tipo de módulo de deformação será realizada no intervalo entre a moldagem e o ensaio dos corpos-de-prova. Por fim, serão realizadas as análises propostas e elaborar-se-á o relatório final.

PARTE V. Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland – Análise química – determinação de resíduo insolúvel – NBR NM 15**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **Agregados – determinação da composição granulométrica – NBR NM 248**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **Agregados – determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio – NBR 6467**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **Cal virgem e cal hidratada – Análise química – NBR 6473**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Projeto de Estruturas de Madeira – NBR 7190**. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **Cimento Portland – determinação da resistência à compressão – NBR 7215**. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **Agregados – determinação da composição granulométrica – NBR 7217**. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Agregados em estado solto – determinação da massa unitária – NBR 7251**. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **Concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação – NBR 8522**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado – NBR 13278**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão – NBR 13279**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido – NBR 13280**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION – NF B 10-511 – **Produits de carrières pierres calcaires – mesure du module d'élasticité dynamique**. Paris, AFNOR, 1975.

BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. São Paulo, 2001. 172p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Methods of testing mortars, screeds and plasters – BS 4551.** Londres, 1980.

_____. **Methods of test mortar for masonry – determination of flexure and compressive strength of hardened mortar – BS EN 1015-11.** Londres, 1999.

_____. **Testing concrete – recommendations for the measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete – BS 1881: Part 203.** Londres, 1986.

_____. **Testing concrete – recommendations for the measurement of dynamic modulus of elasticity – BS 1881: Part 209.** Londres, 1990.

_____. **Testing concrete – determination of ultrasonic pulse velocity – BS EN 12504-4.** Londres, 2004.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística.** São Paulo, Edgard Blücher, 1977.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução.** São Paulo, PINI, 1994.

GODOY, E. H. P.; BARROS, M. M. S. B. **Proposta de procedimento de ensaio para avaliação do módulo de deformação de argamassas.** In.: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 3. Vitória, 1999. Anais, Vitória: SBTA, 1999. p: 159-170.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – fundamentos e aplicações na engenharia civil.** São Paulo, PINI, 2002. p. 124.

JONES, R. **Les essais nos destructifs des bétons.** Paris, Éditions Eryolles, 1967. p. 45.

ANEXO A. Tratamento estatístico dos dados

De modo a se obter uma análise consistente dos dados obtidos, foram utilizadas algumas ferramentas estatísticas, cujo emprego se encontra descrito a seguir. Todas elas se baseiam em testes de hipóteses paramétricos, ou seja, testes sobre os parâmetros referentes à população. Designa-se por H_0 a hipótese existente e, por H_1 , a hipótese alternativa. Os testes levam à aceitação ou rejeição de H_0 , ou, analogamente, à negação ou afirmação de H_1 .

No entanto, existe a probabilidade da conclusão do teste estar errada, ou seja, rejeitar uma hipótese quando a mesma é correta. Esta probabilidade é o nível de significância do teste, α , e para todos os testes realizados no presente estudo este valor foi estipulado em 5% (Figura A - 1). Todo o estudo estatístico que se apresenta a seguir baseia-se em Costa Neto (1977).

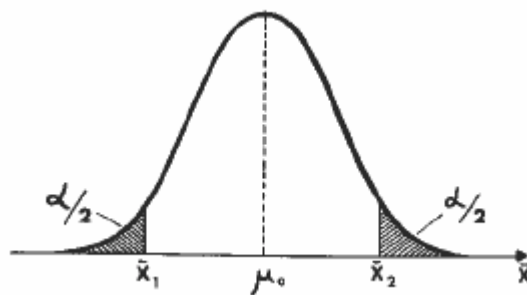


Figura A - 1 - Ilustração da distribuição de Gauss, com a indicação do nível de significância α . $x_2 - \mu_0$ e $\mu_0 - x_1$ são sinônimos para o que é denominado, neste trabalho, de e_0 . A mesma explicação é válida para a curva de t-Student (COSTA NETO, 1977).

A.1. Comparação entre duas médias – dados emparelhados

Segundo Costa Neto (1977), os resultados das duas amostras constituem dados emparelhados quando estão relacionados dois a dois segundo um critério que introduz uma influência marcante entre os diversos pares, que supomos, porém, influir igualmente sobre os valores de cada par. Sendo assim, dispondo-se de corpos-de-prova devidamente identificados, é possível relacionar, por exemplo, um valor obtido por um ensaio não destrutivo com outro obtido posteriormente por meio de um ensaio destrutivo, para o mesmo corpo-de-prova. Por este motivo,

este é o teste empregado na verificação da igualdade entre duas médias de resultados obtidos por diferentes métodos de ensaio. Sendo assim, as hipóteses são:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0 \text{ (ou, alternativamente, } \mu_1 = \mu_2)$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0 \text{ (ou, alternativamente, } \mu_1 \neq \mu_2)$$

Sendo μ_1 e μ_2 as médias da população 1 e 2, respectivamente. Calculam-se as parcelas d_i , que correspondem à diferença de cada par de valores, e, assim, os dados reduzem-se a uma amostra de n diferenças. Desta forma, as hipóteses originais se alteram da seguinte maneira:

$$H_0: \mu_d = 0$$

$$H_1: \mu_d \neq 0$$

Onde μ_d é a média da população das diferenças. O teste é realizado por meio da Equação A - 1.

$$t = \frac{d_{med}}{s_d / \sqrt{n}}$$

Equação A - 1

Onde:

- t : valor calculado de t-Student (a ser comparado com o valor crítico);
- d_{med} : média da amostra das diferenças;
- s_d : desvio-padrão da amostra das diferenças;
- n : tamanho da amostra das diferenças.

O teste consiste na seguinte comparação: se a condição descrita na Equação A - 2 for verificada, rejeita-se H_0 .

$$|t| > t_{crit_{n-1, \alpha/2}}$$

Equação A - 2

Onde $t_{crit_{n-1, \alpha/2}}$ é o valor crítico de t-Student com $n-1$ graus de liberdade e probabilidade $\alpha/2$, onde α é o nível de significância que se deseja do teste.

Nota-se, na Equação A - 1, que o desvio-padrão s_d se encontra no denominador. Portanto, quanto menor o valor de s_d , maior será o t resultante. Pela Equação A - 2, percebe-se que quanto maior o valor calculado de t , menor a chance de se aceitar H_0 . Deste modo, é possível observar que o teste apresentado tem sua tolerância diminuída para valores pequenos de desvio-

padrão, ou seja, valores oriundos de duas amostras com desvios-padrão pequenos podem ser considerados diferentes, mesmo quando a diferença absoluta entre eles é mínima. Esta é uma das distorções do método que foi possível notar durante a análise dos dados, apresentada no item III.4. Para as aplicações práticas a que se destinam as argamassas, tamanha rigorosidade em um teste de igualdade de valores pode não ser plausível.

O fato do teste se tornar mais tolerante para amostras que apresentem desvios-padrão maiores é compreensível e aceitável em termos práticos, pois, de fato, ambos os valores podem ser iguais, considerando-se a variabilidade obtida. Uma ilustração das variações de tolerância do teste apresentado encontra-se na Figura A - 2. Observa-se que, em ambos os casos, a diferença absoluta entre as médias é igual, no entanto, o teste pode chegar a conclusões diferentes de acordo com o valor de desvio-padrão, como representa a área em cinza da figura do segundo caso (atestando a igualdade entre valores).

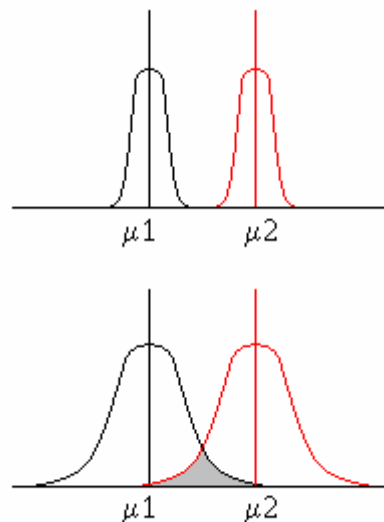


Figura A - 2 - Ilustração das possíveis conclusões da comparação entre duas médias.

A.2. Comparação entre duas médias – dados desemparelhados e σ desconhecido

Este teste é aplicado quando se comparam testes diferentes, e os corpos-de-prova não podem ser relacionados individualmente. Devido a este fato, segundo Costa Neto (1977), não tem sentido calcular diferenças entre valores das duas amostras, e o teste deverá, portanto, ser baseado na diferença $X_{med1} - X_{med2}$

entre as médias das duas amostras, que podem, inclusive, ser de tamanhos diferentes. Desta forma, a expressão para o cálculo de t muda, como mostra a Equação A - 3.

$$t = \frac{x_{med1} - x_{med2}}{\sqrt{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right) + \left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)}}$$

Equação A - 3

Onde:

- x_{medi} : média da amostra i;
- s_i : desvio-padrão da amostra i;
- n_i : número de elementos da amostra i.

Já o $t_{crít}$ passa a ser calculado pela Equação A - 4.

$$v = \frac{(w_1 + w_2)^2}{\left(\frac{w_1^2}{n_1 + 1}\right) + \left(\frac{w_2^2}{n_2 + 1}\right)} - 2 \quad \text{onde } w_i = \frac{s_i^2}{n_i}$$

Equação A - 4

O teste a ser realizado é o mesmo referido na Equação A - 2. Neste caso, vale a mesma análise de tolerância realizada para o método anterior.

A.3.Comparação entre várias médias – amostras de tamanhos diferentes

Neste caso, as hipóteses são:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

H_1 : pelo menos uma das médias é diferente

Para este tipo de comparação, faz-se uso da análise de variância. As hipóteses intrínsecas deste método são: a variância σ^2 permanece a mesma para todas as populações e a variável de interesse apresenta distribuição normal. No entanto, como o método é robusto, mesmo se houver algum afastamento destas hipóteses, os resultados ainda serão satisfatórios.

Para se efetuar a comparação, é necessário calcular as seguintes parcelas, expressas pela Equação A - 5 à Equação A - 15:

$$T_i = \sum_{j=1}^n x_{ij}$$

Equação A - 5

$$T = \sum_{i=1}^k T_i$$

Equação A - 6

$$Q_i = \sum_{j=1}^n x_{ij}^2$$

Equação A - 7

$$Q = \sum_{i=1}^k Q_i$$

Equação A - 8

$$\bar{x}_i = T_i / n_i$$

Equação A - 9

$$\bar{x} = \frac{T}{\sum_{i=1}^k n_i}$$

Equação A - 10

$$S_T^2 = \frac{Q - T^2 / \sum_{i=1}^k n_i}{\sum_{i=1}^k n_i - 1}$$

Equação A - 11

$$S_E^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (T_i^2 / n_i) - T^2 / \sum_{i=1}^k n_i}{k - 1}$$

Equação A - 12

$$S_R^2 = \frac{Q - \sum_{i=1}^k (T_i^2 / n_i)}{\sum_{i=1}^k n_i - k}$$

Equação A - 13

$$F = \frac{S_E^2}{S_R^2}$$

Equação A - 14

$$F > F_{k-1, k(n-1), \alpha}$$

Equação A - 15

Na Equação A - 15, $k-1$ é o número de graus de liberdade do numerador, $k(n-1)$ é o número de graus de liberdade do denominador, e α é o nível de significância selecionado. Estas parcelas correspondem, respectivamente, a a , b e p (nomenclatura adotada no texto). Se a condição expressa pela Equação A - 15 for satisfeita, rejeita-se H_0 .

A.4. Teste da suficiência do número de corpos-de-prova

A estatística também fornece ferramentas para verificar se o número de corpos-de-prova de um determinado ensaio foi o suficiente, dado um nível de significância α , ou seja, uma probabilidade de erro selecionada para o teste. Esta verificação é feita da seguinte maneira: toma-se uma amostra piloto de n' elementos e esta é submetida ao ensaio. Calcula-se o número n de corpos-de-prova que tornariam os resultados do ensaio satisfatórios pela Equação A - 16:

$$n = \frac{t_{n'-1, \alpha/2} \times s}{e_0}$$

Equação A - 16

Onde:

- s : desvio-padrão da amostra piloto;
- e_0 : semi-amplitude do intervalo de confiança (no caso do presente trabalho, foi definido um e_0 correspondente a 10% da média da propriedade a ser avaliada);
- t : valor de t-Student com $n'-1$ graus de liberdade e probabilidade $\alpha/2$.

Caso $n \leq n'$, a amostra piloto já terá sido suficiente. Este teste foi realizado para todos os ensaios de resistência mecânica e módulo de deformação.

A.5. Determinação do nível de significância obtido com um determinado número de corpos de prova

Também é possível estimar o nível de significância α obtido num ensaio, com o número de corpos-de-prova disponível. Para isso, assume-se que a variável de interesse tenha distribuição normal, e, através da Equação A - 17, obtém-se o nível de significância:

$$z_{\alpha/2} = \frac{e_0 \times \sqrt{n}}{\sigma}$$

Equação A - 17

Onde:

- $z_{\alpha/2}$: valor da distribuição normal com probabilidade $\alpha/2$;
- σ : desvio-padrão da população (substituído por s por se tratar de uma amostra);
- n : número de corpos-de-prova;
- e_0 : semi-amplitude do intervalo de confiança (10% do valor da variável de interesse, no caso).

Em algumas análises realizadas, chegou-se a um valor de $\alpha = 0\%$. Isto significaria que o teste é 100% confiável, o que, em termos práticos, é uma situação impossível, tendo em vista que cada método de ensaio envolve uma incerteza. No caso, $\alpha = 0\%$ se deve a um valor de $z_{\alpha/2}$ alto, o que por sua vez pode ser atribuído a um valor de n alto e de σ baixo, caso, por exemplo, dos ensaios de módulo de deformação pelo ultrassom.

Utilizando-se a Equação A - 17, é possível também determinar qual a semi-amplitude do intervalo de confiança e_0 obtida com um nível de significância de 5%, ou seja, com probabilidade de erro de 5% pode-se afirmar que um determinado valor se situa entre $x_{med}-e_0$ e $x_{med}+e_0$, sendo x_{med} a média do valor que está sendo testado.

ANEXO B. Procedimentos de ensaio e adaptações a normas.

B.1. Medição das características geométricas dos corpos-de-prova

Realizaram-se duas medidas de cada dimensão do corpo-de-prova, as quais foram tomadas a aproximadamente 1cm da extremidade, como forma de ponderar eventuais irregularidades do corpo-de-prova. O instrumento de medição utilizado foi o paquímetro digital, tendo sido utilizado o analógico somente para medidas de dimensões maiores do que 15cm.

B.2. Módulo de deformação pelo ultrassom

Neste caso, foi necessário estabelecer um procedimento baseado na BS 1881: Part 203 (BSI, 1986), norma precedente à BS EN 12504-4 (BSI, 2004), cuja aquisição não foi possível.

O procedimento consiste nos passos descritos a seguir:

- Realiza-se a calibração do equipamento de ultrassom, por meio de uma barra padronizada, cujo resultado (tempo de propagação da onda, em μs) é conhecido (Figura B - 1);
- Acoplam-se os transdutores ao corpo-de-prova, por meio de uma fina camada de vaselina, previamente passada na face dos transdutores que ficará em contato com o corpo de prova (Figura B - 2);
- Pressiona-se o transdutor contra o corpo-de-prova com máxima força (evitando escorregamento) e realiza-se a leitura – somente uma leitura por corpo-de-prova;
- Antes da realização da leitura de um novo corpo de prova, deve-se limpar cuidadosamente o transdutor, retirando-se a vaselina, de modo que não fiquem resíduos sobre sua superfície, que possam interferir no acoplamento e conseqüentemente no resultado do próximo ensaio; uma nova camada de vaselina deverá ser passada;

- A cada cinco corpos-de-prova ensaiados, realiza-se novamente a calibração do equipamento de ultrassom.



Figura B - 1 - Calibração do equipamento de ultrassom, com tempo de propagação da onda esperado indicado (25,7 μ s).



Figura B - 2 - Aplicação de vaselina na superfície do transdutor.

B.3. Resistência à compressão

Neste caso, a adaptação feita à BS EN 1015-11 (BSI, 1999) refere-se ao formato de corpo-de-prova, já que a norma prevê a utilização somente do corpo-de-prova prismático. Sendo assim, para sua aplicação ao cubo e ao cilindro, realizou-se o cálculo da velocidade de carregamento baseando-se no valor médio de tensão fornecido pela norma, de 0,065MPa/s. As velocidades de carregamento resultantes foram as seguintes:

- Cubo: 650N/s;
- Cilindro: 128N/s;
- Prisma: 100N/s.

B.4. Módulo de deformação estático, à compressão

O procedimento para este ensaio foi elaborado a partir das prescrições da norma BS EN 1015-11 (BSI, 1999), no que diz respeito à velocidade de carregamento (idênticas às do ensaio de resistência à compressão), e da norma NBR 8522 (ABNT, 2003), no que se refere aos ciclos de carregamento.

O ensaio tem início com a aplicação de três ciclos de carregamento para possibilitar acomodações do corpo-de-prova que pudessem vir a interferir nas medidas de deformação. Estes ciclos foram aplicados conforme mostra a Figura B - 3. Uma das adaptações à NBR 8522 (ABNT, 2003) é a aplicação da carga de 100N no final da fase de pré-carregamento. Isto foi definido para que o corpo-de-prova não ficasse totalmente desprovido de carga, retrocedendo em suas acomodações, fato que se mostrou indesejável em análises anteriores com corpos-de-prova de sacrifício utilizados para testar os “*scripts*” de ensaio. Os patamares observados na Figura B - 3 foram adotados somente para o cubo, pois era necessária uma pausa para a realização da leitura dos relógios comparadores.

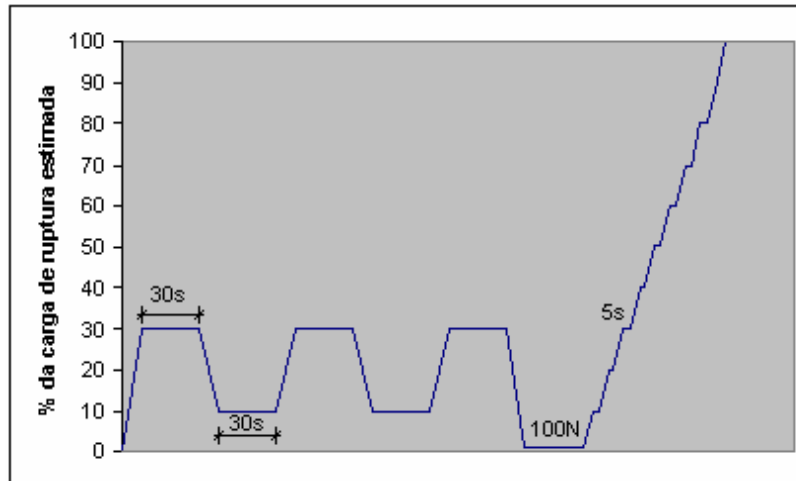


Figura B - 3 - Representação do plano de carregamento adotado para o ensaio de módulo de deformação à compressão.

As leituras de deformação, para construção da curva $\sigma \times \epsilon$ dos corpos-de-prova, foram feitas nos seguintes patamares: 0% (100N), 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80% da carga de ruptura, exceto para o cubo do traço T1, pois o limite de aplicação de carga da prensa é menor do que 70% da carga de ruptura deste tipo de corpo-de-prova, razão pela qual foram excluídas as duas últimas

medidas do script de ensaio. Depois de atingidos os 80% da carga de ruptura (ou o limite estabelecido para o cubo do traço T1 – vide “*script*” de ensaio no ANEXO F), liberava-se o carregamento até a ruptura, ou até o limite da máquina.

B.5. Resistência à tração na flexão e módulo de deformação à tração na flexão para o corpo-de-prova em forma de placa.

O procedimento seguido foi o adotado por Bastos (2001). No entanto, foram realizadas algumas mudanças no que diz respeito à forma de carregamento.

Como a prensa INSTRON utilizada é mais precisa na medição de deslocamentos do que de cargas, decidiu-se, com base no tempo de duração do ensaio, adotar uma velocidade de aplicação de deslocamento de 0,2mm/min, enquanto Bastos (2001) adota uma velocidade de aplicação de carga de 0,02kN/minuto. O carregamento é contínuo tanto para o ensaio de resistência como para o de módulo, partindo-se do ponto de deformação nula, até a ruptura do corpo-de-prova.

Uma das diferenças entre o ensaio de resistência e o de módulo é que o segundo exige a medição da flecha do corpo-de-prova, que é realizada por um instrumento chamado LVDT, ilustrado na Figura B - 4. Como as argamassas podem apresentar ruptura frágil, foi necessário estabelecer, para cada uma das argamassas, o patamar de interrupção na aplicação de deslocamento, para que se pudesse retirar o dispositivo (que é extremamente delicado), de modo a se evitar possíveis danos ao mesmo. Os patamares são os seguintes:

- 0,35mm para o traço T1;
- 0,30mm para o traço T2.

Estes valores foram estipulados a partir da observação do comportamento de corpos-de-prova de sacrifício. Após a retirada do LVDT, os corpos-de-prova eram liberados para ruptura.



Figura B - 4 - Ilustração do dispositivo de medida da flecha (LVDT).

B.6. Densidade de massa específica pelo picnômetro de gás Hélio.

O princípio deste ensaio baseia-se em inferir o volume de uma amostra pela variação de pressão advinda da transferência de gás entre recipientes. O procedimento do ensaio é descrito abaixo:

- Tara-se o recipiente (R1), de volume conhecido (V1), que deverá receber a amostra do material cuja densidade de massa específica será determinada.
- Coloca-se a amostra em R1, pesando-a;
- Coloca-se R1, com a amostra, no picnômetro (ilustrado pela Figura B - 5);
- Fecha-se a válvula que conecta R1 ao recipiente de gás Hélio (R2), também de volume conhecido (V2);
- Zera-se o equipamento;
- Fecha-se a saída de gás, injetando-se então gás Hélio em R2;
- Registra-se a pressão P1;
- Abre-se a válvula;
- Após a estabilização da transferência de gás, registra-se P2;
- Libera-se a saída de gás;

- Retira-se a amostra, descartando-a.

O volume da amostra é calculado através da Equação B - 1.

$$P2 \times (V2 + V1 + V_{amostra}) = P1 \times V2$$

Equação B - 1

A amostra, antes de ser submetida ao ensaio, deve permanecer em estufa, a 100°C, por 1 dia.



Figura B - 5 - Picnômetro de gás Hélio.

ANEXO C. Resultados da caracterização no estado anidro

Os resultados referentes à granulometria encontram-se na Tabela C - 1 e Tabela C - 2, enquanto os que dizem respeito à densidade de massa específica estão apresentados na Tabela C - 3, Tabela C - 4 e Tabela C - 5. Os resultados da determinação da sílica e do resíduo insolúvel encontram-se na Tabela C - 6.

Tabela C - 1 - Detalhamento dos resultados do ensaio de caracterização granulométrica - amostra 1.

| Peneira | Abertura (mm) | Tara bacia (g) | Massa retida (g) | Mareia retida (g) | Macum. (g) | % retida acum. | % pass. acum. |
|---------|---------------|----------------|------------------|-------------------|------------|----------------|---------------|
| 1 | 4,76 | 113,02 | - | - | 0,00 | 0,00% | 100,00% |
| 2 | 2,38 | 112,16 | - | - | 0,00 | 0,00% | 100,00% |
| 3 | 1,19 | 106,38 | - | - | 0,00 | 0,00% | 100,00% |
| 4 | 0,59 | 113,95 | 114,64 | 0,69 | 0,69 | 0,22% | 99,78% |
| 5 | 0,297 | 113,28 | 189,40 | 76,12 | 76,81 | 24,04% | 75,96% |
| 6 | 0,149 | 112,60 | 280,49 | 167,89 | 244,70 | 76,58% | 23,42% |
| Fundo | 0 | 112,16 | 186,98 | 74,82 | 319,52 | 100,00% | 0,00% |
| | | | mtotal | 319,52 | M.F. | 2,01 | |
| | | | minicial | 321,00 | | | |
| | | | Δ | 1,48 | | | |
| | | | % | 0,46% | | | |

Tabela C - 2 - Detalhamento dos resultados do ensaio de caracterização granulométrica - amostra 2.

| Peneira | Abertura (mm) | Tara bacia (g) | Massa retida (g) | Mareia retida (g) | Macum. (g) | % retida acum. | % pass. acum. |
|---------|---------------|----------------|------------------|-------------------|------------|----------------|---------------|
| 1 | 4,76 | 113,02 | - | - | 0,00 | 0,00% | 100,00% |
| 2 | 2,38 | 112,16 | - | - | 0,00 | 0,00% | 100,00% |
| 3 | 1,19 | 106,38 | - | - | 0,00 | 0,00% | 100,00% |
| 4 | 0,59 | 113,95 | 114,66 | 0,71 | 0,71 | 0,22% | 99,78% |
| 5 | 0,297 | 113,28 | 197,77 | 84,49 | 85,20 | 26,75% | 73,25% |
| 6 | 0,149 | 112,60 | 283,98 | 171,38 | 256,58 | 80,56% | 19,44% |
| Fundo | 0 | 112,16 | 174,06 | 61,90 | 318,48 | 100,00% | 0,00% |
| | | | mtotal | 318,48 | M.F. | 2,08 | |
| | | | minicial | 320,00 | | | |
| | | | Δ | 1,52 | | | |
| | | | % | 0,47% | | | |

Tabela C - 3 - Resultados do ensaio de densidade de massa específica no picnômetro, para o cimento.

| P1 | P2 | Peso (g) | Vcell | Vref | A | B | Volume | Densidade | |
|---------------|-------|----------|--------|----------|----------|----------|--------|-----------|-------------------|
| 17,062 | 6,288 | 4,0280 | 11,774 | 6,089623 | 1,713422 | 10,4341 | 1,3399 | 3,006 | |
| 17,060 | 6,258 | 3,7770 | 11,774 | 6,089623 | 1,726111 | 10,51136 | 1,2626 | 2,991 | |
| 17,058 | 6,266 | 3,8380 | 11,774 | 6,089623 | 1,722311 | 10,48822 | 1,2858 | 2,985 | |
| 17,062 | 6,271 | 3,8530 | 11,774 | 6,089623 | 1,720778 | 10,47889 | 1,2951 | 2,975 | |
| 17,060 | 6,300 | 4,0880 | 11,774 | 6,089623 | 1,707937 | 10,40069 | 1,3733 | 2,977 | |
| Medidas | | | | | | | | 5 | - |
| Média | | | | | | | | 2,987 | g/cm ³ |
| Desvio Padrão | | | | | | | | 0,013 | g/cm ³ |
| CV | | | | | | | | 0,423 | % |
| Max | | | | | | | | 3,006 | g/cm ³ |
| Min | | | | | | | | 2,975 | g/cm ³ |

Tabela C - 4 - Resultados do ensaio de densidade de massa específica no picnômetro, para a cal.

| P1 | P2 | Peso (g) | Vcell | Vref | A | B | Volume | Densidade | |
|---------------|-------|----------|--------|----------|----------|----------|--------|-----------|-------------------|
| 17,060 | 6,061 | 1,6070 | 11,774 | 6,089623 | 1,814717 | 11,05094 | 0,7231 | 2,223 | |
| 17,060 | 6,055 | 1,5780 | 11,774 | 6,089623 | 1,817506 | 11,06793 | 0,7061 | 2,235 | |
| 17,061 | 6,070 | 1,6710 | 11,774 | 6,089623 | 1,810708 | 11,02653 | 0,7475 | 2,236 | |
| 17,061 | 6,071 | 1,6730 | 11,774 | 6,089623 | 1,810245 | 11,02371 | 0,7503 | 2,230 | |
| 17,060 | 6,070 | 1,6720 | 11,774 | 6,089623 | 1,810544 | 11,02553 | 0,7485 | 2,234 | |
| Medidas | | | | | | | | 5 | - |
| Média | | | | | | | | 2,231 | g/cm ³ |
| Desvio Padrão | | | | | | | | 0,005 | g/cm ³ |
| CV | | | | | | | | 0,243 | % |
| Max | | | | | | | | 2,236 | g/cm ³ |
| Min | | | | | | | | 2,223 | g/cm ³ |

Tabela C - 5 - Resultados do ensaio de densidade de massa específica no picnômetro, para a areia.

| P1 | P2 | Peso (g) | Vcell | Vref | A | B | Volume | Densidade | |
|---------------|-------|----------|--------|----------|----------|----------|--------|-----------|-------------------|
| 17,067 | 6,596 | 5,5590 | 11,774 | 6,089623 | 1,587477 | 9,667138 | 2,1069 | 2,639 | |
| 17,065 | 6,625 | 5,7510 | 11,774 | 6,089623 | 1,575849 | 9,596327 | 2,1777 | 2,641 | |
| 17,063 | 6,610 | 5,6010 | 11,774 | 6,089623 | 1,581392 | 9,63008 | 2,1439 | 2,613 | |
| 17,065 | 6,575 | 5,3570 | 11,774 | 6,089623 | 1,595437 | 9,715611 | 2,0584 | 2,603 | |
| 17,064 | 6,595 | 5,4780 | 11,774 | 6,089623 | 1,587415 | 9,666757 | 2,1072 | 2,600 | |
| Medidas | | | | | | | | 5 | - |
| Média | | | | | | | | 2,619 | g/cm ³ |
| Desvio Padrão | | | | | | | | 0,020 | g/cm ³ |
| CV | | | | | | | | 0,752 | % |
| Max | | | | | | | | 2,641 | g/cm ³ |
| Min | | | | | | | | 2,600 | g/cm ³ |

Tabela C - 6 - Resultados do ensaio de determinação de sílica e resíduo insolúvel, para a cal.

| Amostra | Tara (g) | Massa da amostra (g) | Após calcinação (g) | SiO ₂ + R.I. |
|---------|----------|----------------------|---------------------|-------------------------|
| A | 35,1553 | 0,5009 | 35,1622 | 1,38% |
| B | 36,7043 | 0,5001 | 36,7107 | 1,28% |
| | | | média | 1,33% |
| | | | desv. pad. | 0,07% |
| | | | coef. var. | 5,32% |

ANEXO D. Resultados da caracterização no estado endurecido

D.1. Barra

D.1.1. Traço 1

Os resultados estão apresentados nas seguintes tabelas: Tabela D - 1, Tabela D - 2 e Tabela D - 3.

Tabela D - 1 - Resultados da caracterização geométrica e pesagem dos corpos-de-prova, para a barra de traço T1.

| CP | L1 (mm) | | | L2 (mm) | | | L3 (mm) | | | Volume (cm ³) | Massa (g) | δ (g/cm ³) |
|----|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|--------|--------|---------------------------|-----------|-------------------------------|
| | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | | | |
| 1 | 26,30 | 26,06 | 26,18 | 25,88 | 25,32 | 25,60 | 285,05 | 285,15 | 285,10 | 191,08 | 359,75 | 1,88 |
| 2 | 26,61 | 26,22 | 26,42 | 25,50 | 25,37 | 25,44 | 284,20 | 284,05 | 284,13 | 190,89 | 355,96 | 1,86 |
| 3 | 26,40 | 26,23 | 26,32 | 25,50 | 25,80 | 25,65 | 284,30 | 284,35 | 284,33 | 191,91 | 360,31 | 1,88 |
| 4 | 26,00 | 25,65 | 25,83 | 25,40 | 25,77 | 25,59 | 286,15 | 286,20 | 286,18 | 189,09 | 359,07 | 1,90 |
| 5 | 26,33 | 25,52 | 25,93 | 25,33 | 25,03 | 25,18 | 285,95 | 286,00 | 285,98 | 186,68 | 350,37 | 1,88 |
| 6 | 25,48 | 26,12 | 25,80 | 25,12 | 25,26 | 25,19 | 286,20 | 286,20 | 286,20 | 186,00 | 352,30 | 1,89 |
| 7 | 26,52 | 25,60 | 26,06 | 25,42 | 25,75 | 25,59 | 286,00 | 286,00 | 286,00 | 190,69 | 362,49 | 1,90 |
| 8 | 25,75 | 26,00 | 25,88 | 25,25 | 25,06 | 25,16 | 284,55 | 284,70 | 284,63 | 185,26 | 351,30 | 1,90 |
| 9 | 25,80 | 26,18 | 25,99 | 25,22 | 25,55 | 25,39 | 285,50 | 285,55 | 285,53 | 188,38 | 357,54 | 1,90 |
| 10 | 25,69 | 25,66 | 25,68 | 25,38 | 25,47 | 25,43 | 285,20 | 285,20 | 285,20 | 186,17 | 352,35 | 1,89 |
| 11 | 25,69 | 26,05 | 25,87 | 25,21 | 24,91 | 25,06 | 285,45 | 285,50 | 285,48 | 185,07 | 349,29 | 1,89 |
| 12 | 27,12 | 26,35 | 26,74 | 25,57 | 26,03 | 25,80 | 285,25 | 285,30 | 285,28 | 196,77 | 367,90 | 1,87 |
| 13 | 26,68 | 26,60 | 26,64 | 25,26 | 25,48 | 25,37 | 285,10 | 285,05 | 285,08 | 192,67 | 365,20 | 1,90 |
| 14 | 26,86 | 26,52 | 26,69 | 25,91 | 25,87 | 25,89 | 284,90 | 284,85 | 284,88 | 196,85 | 371,22 | 1,89 |
| 15 | 26,37 | 26,33 | 26,35 | 25,48 | 25,72 | 25,60 | 284,30 | 284,40 | 284,35 | 191,81 | 358,35 | 1,87 |
| 16 | 26,50 | 26,32 | 26,41 | 25,69 | 25,54 | 25,62 | 283,55 | 283,50 | 283,53 | 191,80 | 369,48 | 1,93 |
| 17 | 25,60 | 25,88 | 25,74 | 25,70 | 25,88 | 25,79 | 284,20 | 283,80 | 284,00 | 188,53 | 360,54 | 1,91 |
| 18 | 27,00 | 26,83 | 26,92 | 25,07 | 25,30 | 25,19 | 284,30 | 284,40 | 284,35 | 192,75 | 359,86 | 1,87 |
| 19 | 27,11 | 27,61 | 27,36 | 25,88 | 25,79 | 25,84 | 284,45 | 284,35 | 284,40 | 201,03 | 375,04 | 1,87 |
| 20 | 27,16 | 26,61 | 26,89 | 25,57 | 25,77 | 25,67 | 284,45 | 284,40 | 284,43 | 196,29 | 371,20 | 1,89 |

Tabela D - 2 - Resultados do ensaio de módulo de deformação pelo ultrassom, para a barra de traço T1.

| CP | Tempo (µs) | Velocidade (km/s) | E (GPa) |
|-------------------------|------------|-------------------|---------|
| 1 | 107,2 | 2,66 | 11,99 |
| 2 | 106,6 | 2,67 | 11,92 |
| 3 | 111,3 | 2,55 | 11,03 |
| 4 | 103,3 | 2,77 | 13,12 |
| 5 | 105,4 | 2,71 | 12,43 |
| 6 | 103,8 | 2,76 | 12,96 |
| 7 | 103,6 | 2,76 | 13,04 |
| 8 | 100,4 | 2,83 | 13,72 |
| 9 | 101,7 | 2,81 | 13,46 |
| 10 | 102,6 | 2,78 | 13,16 |
| 11 | 105,2 | 2,71 | 12,51 |
| 12 | 101,9 | 2,80 | 13,19 |
| 13 | 104,5 | 2,73 | 12,70 |
| 14 | 103,2 | 2,76 | 12,93 |
| 15 | 109,8 | 2,59 | 11,28 |
| 16 | 100,8 | 2,81 | 13,72 |
| 17 | 102,8 | 2,76 | 13,14 |
| 18 | 106,4 | 2,67 | 12,00 |
| 19 | 103,0 | 2,76 | 12,80 |
| 20 | 103,1 | 2,76 | 12,95 |
| média | | | 12,70 |
| desvio-padrão | | | 0,74 |
| coeficiente de variação | | | 5,80% |

Tabela D - 3 - Resultados do ensaio de módulo de deformação pela frequência de ressonância, com diferentes modos de posicionamento do corpo-de-prova, para a barra de traço T1.

| CP | Posicionamento diagonal | | | | Posicionamento horizontal | | | | |
|-------------------|-------------------------|----------|-------------|---------|---------------------------|----------|-------------|---------|-------|
| | f1 (kHz) | f2 (kHz) | média (kHz) | E (GPa) | f3 (kHz) | f4 (kHz) | média (kHz) | E (GPa) | |
| 1 | 4,73707 | 4,16350 | 4,45029 | 12,12 | 4,18052 | 4,14125 | 4,16089 | 10,60 | |
| 2 | 4,07302 | 4,05518 | 4,06410 | 9,95 | 4,18048 | 4,08636 | 4,13342 | 10,29 | |
| 3 | 4,03698 | 4,09908 | 4,06803 | 10,05 | 4,10032 | 4,08378 | 4,09205 | 10,17 | |
| 4 | 4,41882 | 4,34656 | 4,38269 | 11,95 | 4,39392 | 4,35061 | 4,37227 | 11,89 | |
| 5 | 4,33697 | 4,35925 | 4,34811 | 11,61 | 4,36934 | 4,32791 | 4,34863 | 11,61 | |
| 6 | 4,29738 | 4,33072 | 4,31405 | 11,55 | 4,32934 | 4,31938 | 4,32436 | 11,60 | |
| 7 | 4,31289 | 4,33281 | 4,32285 | 11,62 | 4,34045 | 4,30394 | 4,32220 | 11,62 | |
| 8 | 4,34679 | 4,35764 | 4,35222 | 11,64 | 4,46054 | 4,45290 | 4,45672 | 12,20 | |
| 9 | 4,29760 | 4,35517 | 4,32639 | 11,58 | 4,33751 | 4,41136 | 4,37444 | 11,84 | |
| 10 | 4,19960 | 4,21471 | 4,20711 | 10,90 | 4,22727 | 4,24192 | 4,23460 | 11,04 | |
| 11 | 4,24106 | 4,32668 | 4,28387 | 11,29 | 4,27355 | 4,23397 | 4,25376 | 11,13 | |
| 12 | 4,44280 | 4,34652 | 4,39466 | 11,75 | 4,48596 | 4,36195 | 4,42396 | 11,91 | |
| 13 | 4,36538 | 4,31540 | 4,34039 | 11,61 | 4,34225 | 4,34290 | 4,34258 | 11,62 | |
| 14 | 4,32690 | 4,28901 | 4,30796 | 11,36 | 4,32505 | 4,32350 | 4,32428 | 11,45 | |
| 15 | 4,25731 | 4,32931 | 4,29331 | 11,14 | 4,23391 | 4,16847 | 4,20119 | 10,66 | |
| 16 | 4,52793 | 4,52645 | 4,52719 | 12,70 | 4,58253 | 4,52274 | 4,55264 | 12,84 | |
| 17 | 4,36376 | 4,39121 | 4,37749 | 11,82 | 4,42189 | 4,56629 | 4,49409 | 12,46 | |
| 18 | 4,28072 | 4,35076 | 4,31574 | 11,25 | 4,37214 | 4,34459 | 4,35837 | 11,47 | |
| 19 | 4,34095 | 4,36369 | 4,35232 | 11,43 | 4,43067 | 4,37485 | 4,40276 | 11,70 | |
| 20 | 4,36911 | 4,49506 | 4,43209 | 12,02 | 4,36330 | 4,50731 | 4,43531 | 12,04 | |
| média | | | 4,32304 | 11,47 | média | | | 4,33042 | 11,51 |
| desvio-padrão | | | 0,11059 | 0,63 | desvio-padrão | | | 0,12103 | 0,69 |
| coef. de variação | | | 2,56% | 5,54% | coef. de variação | | | 2,79% | 6,03% |

D.1.2. Traço 2

Os resultados estão apresentados nas seguintes tabelas: Tabela D - 4, Tabela D - 5 e Tabela D - 6.

Tabela D - 4 – Resultados da caracterização geométrica e pesagem dos corpos-de-prova, para a barra de traço T2.

| CP | L1 (mm) | | | L2 (mm) | | | L3 (mm) | | | Volume (cm ³) | Massa (g) | δ (g/cm ³) |
|----|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|--------|--------|---------------------------|-----------|-------------------------------|
| | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | | | |
| 1 | 25,72 | 25,91 | 25,82 | 25,88 | 25,01 | 25,45 | 282,95 | 283,20 | 283,08 | 185,9414 | 335,42 | 1,80 |
| 2 | 26,10 | 25,89 | 26,00 | 25,36 | 25,20 | 25,28 | 282,90 | 282,85 | 282,88 | 185,8923 | 339,09 | 1,82 |
| 3 | 25,87 | 25,98 | 25,93 | 25,28 | 25,62 | 25,45 | 282,45 | 282,25 | 282,35 | 186,2921 | 334,99 | 1,80 |

Tabela D - 5 - Resultados do ensaio de módulo de deformação pelo ultrassom, para a barra de traço T2.

| CP | Tempo (μ s) | Velocidade (km/s) | E (GPa) |
|-------------------------|------------------|-------------------|---------|
| 1 | 146,1 | 1,937542779 | 6,09 |
| 2 | 144,5 | 1,957612457 | 6,29 |
| 3 | 151,1 | 1,868630046 | 5,65 |
| média | | | 6,01 |
| desvio-padrão | | | 0,33 |
| coeficiente de variação | | | 5,46% |

Tabela D - 6 - Resultados do ensaio de módulo de deformação pela frequência de ressonância para a barra de traço T2.

| CP | Posicionamento diagonal | | | E (GPa) |
|-------------------------|-------------------------|----------|-------------|---------|
| | f1 (kHz) | f2 (kHz) | média (kHz) | |
| 1 | 3,51323 | 3,38160 | 3,44742 | 6,87 |
| 2 | 3,30182 | 3,34600 | 3,32391 | 6,45 |
| 3 | 3,34517 | 3,24148 | 3,29333 | 6,22 |
| média | | | 3,35 | 6,51 |
| desvio-padrão | | | 0,08 | 0,33 |
| coeficiente de variação | | | 2,43% | 5,08% |

D.2. Cilindro

D.2.1. Traço 1

Os resultados encontram-se apresentados da Tabela D - 7 à Tabela D - 13, e na Figura D - 1.

Tabela D - 7 - Resultados da caracterização geométrica e pesagem dos corpos-de-prova, para o cilindro de traço T1.

| CP | Altura (mm) | | | Diâmetro (mm) | | | Área (cm ²) | Volume (cm ³) | Massa (g) | δ (g/cm ³) |
|----|-------------|--------|--------|---------------|-------|-------|-------------------------|---------------------------|-----------|------------------------|
| | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | | | | |
| 1 | 100,13 | 100,13 | 100,13 | 50,13 | 50,12 | 50,13 | 19,73 | 197,59 | 375,31 | 1,90 |
| 2 | 99,04 | 98,90 | 98,97 | 50,02 | 49,99 | 50,01 | 19,64 | 194,37 | 373,40 | 1,92 |
| 3 | 99,75 | 99,79 | 99,77 | 50,33 | 50,29 | 50,31 | 19,88 | 198,33 | 374,91 | 1,89 |
| 4 | 99,00 | 99,06 | 99,03 | 49,90 | 49,90 | 49,90 | 19,56 | 193,67 | 370,81 | 1,91 |
| 5 | 99,51 | 99,43 | 99,47 | 50,31 | 50,03 | 50,17 | 19,77 | 196,64 | 375,54 | 1,91 |
| 6 | 98,55 | 98,49 | 98,52 | 50,08 | 50,05 | 50,07 | 19,69 | 193,95 | 370,11 | 1,91 |
| 7 | 99,41 | 99,43 | 99,42 | 50,06 | 50,23 | 50,14 | 19,75 | 196,31 | 374,05 | 1,91 |
| 8 | 100,16 | 100,15 | 100,16 | 50,00 | 49,95 | 49,98 | 19,62 | 196,46 | 370,93 | 1,89 |
| 9 | 99,88 | 99,88 | 99,88 | 49,95 | 49,98 | 49,97 | 19,61 | 195,84 | 370,25 | 1,89 |
| 10 | 97,84 | 98,18 | 98,01 | 50,00 | 49,89 | 49,95 | 19,59 | 192,02 | 367,45 | 1,91 |
| 11 | 99,40 | 99,35 | 99,38 | 49,84 | 49,98 | 49,91 | 19,56 | 194,42 | 367,55 | 1,89 |
| 12 | 99,73 | 99,49 | 99,61 | 50,21 | 50,10 | 50,16 | 19,76 | 196,80 | 375,74 | 1,91 |
| 13 | 99,08 | 99,04 | 99,06 | 49,84 | 49,84 | 49,84 | 19,51 | 193,26 | 371,10 | 1,92 |
| 14 | 100,08 | 99,94 | 100,01 | 50,15 | 50,18 | 50,17 | 19,76 | 197,67 | 372,49 | 1,88 |
| 15 | 99,17 | 99,29 | 99,23 | 50,05 | 50,08 | 50,07 | 19,69 | 195,34 | 370,70 | 1,90 |
| 16 | 99,38 | 99,43 | 99,41 | 50,11 | 50,06 | 50,09 | 19,70 | 195,85 | 372,51 | 1,90 |
| 17 | 99,16 | 99,17 | 99,17 | 50,20 | 50,31 | 50,26 | 19,84 | 196,70 | 373,65 | 1,90 |
| 18 | 99,35 | 99,45 | 99,40 | 50,15 | 50,11 | 50,13 | 19,74 | 196,19 | 372,28 | 1,90 |
| 19 | 98,31 | 98,23 | 98,27 | 50,11 | 50,13 | 50,12 | 19,73 | 193,88 | 369,92 | 1,91 |
| 20 | 99,77 | 99,91 | 99,84 | 50,13 | 49,92 | 50,03 | 19,65 | 196,23 | 370,70 | 1,89 |

Tabela D - 8 - Resultados do ensaio de módulo de deformação pelo ultrassom, realizado por diferentes operadores, para o cilindro de traço T1.

| CP | Operador 1 | | | Operador 2 | | | |
|-------------------------|------------|-------------------|---------|-------------------|-------------------|---------|-------|
| | Tempo (µs) | Velocidade (km/s) | E (GPa) | Tempo (µs) | Velocidade (km/s) | E (GPa) | |
| 1 | 37,2 | 2,69 | 12,39 | 37,0 | 2,71 | 12,52 | |
| 2 | 36,8 | 2,69 | 12,51 | 36,5 | 2,71 | 12,71 | |
| 3 | 37,2 | 2,68 | 12,24 | 36,7 | 2,72 | 12,57 | |
| 4 | 37,4 | 2,65 | 12,08 | 37,2 | 2,66 | 12,21 | |
| 5 | 37,1 | 2,68 | 12,36 | 36,7 | 2,71 | 12,63 | |
| 6 | 36,8 | 2,68 | 12,31 | 37,2 | 2,65 | 12,05 | |
| 7 | 36,7 | 2,71 | 12,59 | 36,7 | 2,71 | 12,59 | |
| 8 | 38,0 | 2,64 | 11,80 | 38,0 | 2,64 | 11,80 | |
| 9 | 38,2 | 2,61 | 11,63 | 38,1 | 2,62 | 11,69 | |
| 10 | 36,3 | 2,70 | 12,56 | 36,0 | 2,72 | 12,77 | |
| 11 | 38,0 | 2,62 | 11,64 | 37,9 | 2,62 | 11,70 | |
| 12 | 36,5 | 2,73 | 12,80 | 36,2 | 2,75 | 13,01 | |
| 13 | 36,8 | 2,69 | 12,52 | 36,6 | 2,71 | 12,66 | |
| 14 | 38,2 | 2,62 | 11,62 | 38,2 | 2,62 | 11,62 | |
| 15 | 37,7 | 2,63 | 11,83 | 37,6 | 2,64 | 11,90 | |
| 16 | 37,6 | 2,64 | 11,96 | 37,5 | 2,65 | 12,03 | |
| 17 | 38,0 | 2,61 | 11,64 | 37,8 | 2,62 | 11,77 | |
| 18 | 36,6 | 2,72 | 12,60 | 36,7 | 2,71 | 12,53 | |
| 19 | 37,4 | 2,63 | 11,86 | 36,7 | 2,68 | 12,31 | |
| 20 | 37,3 | 2,68 | 12,18 | 37,2 | 2,68 | 12,25 | |
| média | | | 12,16 | média | | | 12,27 |
| desvio-padrão | | | 0,38 | desvio-padrão | | | 0,42 |
| coeficiente de variação | | | 3,15% | coef. de variação | | | 3,44% |

Tabela D - 9 - Resultados do ensaio de resistência à compressão realizado na prensa EMIC, para o cilindro de traço T1.

| CP | Carga de ruptura (N) | σ ruptura (MPa) |
|----------|----------------------|------------------------|
| 1 | 22746 | 11,53 |
| 2 | 20839 | 10,61 |
| 3 | 22784 | 11,46 |
| 4 | 21849 | 11,17 |
| média | 22055 | 11,19 |
| desv pad | 918 | 0,42 |
| coef var | 4,16% | 3,73% |

Tabela D - 10 - Resultados do ensaio de resistência à compressão realizado na prensa do IPT, para o cilindro de traço T1.

| CP | Carga de ruptura (N) | σ ruptura (MPa) |
|----------|----------------------|------------------------|
| 16 | 23440 | 11,90 |
| 17 | 22020 | 11,10 |
| 18 | 23060 | 11,68 |
| média | 22840 | 11,56 |
| desv pad | 735 | 0,41 |
| coef var | 3,22% | 3,56% |

Tabela D - 11 - Medidas de deslocamento, fornecidas pelo extensômetro, e de carga máxima atingida para o ensaio de módulo de deformação à compressão, para o cilindro de traço T1.

| CP | L0% (mm) | L10% (mm) | L20% (mm) | L30% (mm) | L40% (mm) | L50% (mm) | L60% (mm) | L70% (mm) | L80% (mm) | Fmax (kN) |
|----|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 5 | 0,00028 | 0,00439 | 0,00906 | 0,01392 | 0,01915 | 0,02531 | 0,03250 | 0,04119 | 0,05137 | 22,11 |
| 6 | 0,00028 | 0,00476 | 0,00962 | 0,01494 | 0,02073 | 0,02774 | 0,03530 | 0,04371 | 0,05333 | 21,95 |
| 7 | 0,00037 | 0,00448 | 0,00934 | 0,01476 | 0,02045 | 0,02681 | 0,03390 | 0,04194 | 0,05202 | 22,41 |
| 8 | 0,00065 | 0,00495 | 0,00999 | 0,01588 | 0,02223 | 0,02933 | 0,03727 | 0,04689 | 0,06015 | 20,48 |
| 9 | 0,00037 | 0,00542 | 0,01074 | 0,01728 | 0,02419 | 0,03176 | 0,03997 | 0,04987 | 0,06192 | 21,21 |
| 10 | 0,00196 | 0,00813 | 0,01401 | 0,02064 | 0,02737 | 0,03549 | 0,04520 | 0,05791 | 0,07902 | 18,15 |
| 12 | 0,00075 | 0,00514 | 0,00990 | 0,01560 | 0,02186 | 0,02895 | 0,03652 | 0,04455 | 0,05342 | 23,36 |
| 13 | 0,00093 | 0,00598 | 0,01121 | 0,01728 | 0,02363 | 0,03157 | 0,04053 | 0,05053 | 0,06202 | 20,48 |
| 14 | 0,00103 | 0,00523 | 0,01009 | 0,01606 | 0,02232 | 0,02942 | 0,03736 | 0,04633 | 0,05800 | 21,31 |
| 15 | 0,00093 | 0,00551 | 0,01055 | 0,01588 | 0,02158 | 0,02895 | 0,03773 | 0,04866 | 0,06398 | 20,65 |

Carga de ruptura estimada: 22050N

Tabela D - 12 - Resultados de tensão e deformação para o ensaio de módulo de deformação à compressão, para o cilindro de traço T1.

| CP | % da carga de ruptura | 0% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% |
|----|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Força (N) | 0 | 2205 | 4410 | 6615 | 8820 | 11025 | 13230 | 15435 | 17640 |
| 5 | σ (MPa) | 0,00 | 1,12 | 2,23 | 3,35 | 4,46 | 5,58 | 6,69 | 7,81 | 8,92 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00008 | 0,00018 | 0,00027 | 0,00038 | 0,00050 | 0,00064 | 0,00082 | 0,00102 |
| 6 | σ (MPa) | 0,00 | 1,12 | 2,24 | 3,36 | 4,48 | 5,60 | 6,72 | 7,84 | 8,96 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00009 | 0,00019 | 0,00029 | 0,00041 | 0,00055 | 0,00070 | 0,00087 | 0,00106 |
| 7 | σ (MPa) | 0,00 | 1,12 | 2,23 | 3,35 | 4,47 | 5,58 | 6,70 | 7,82 | 8,93 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00008 | 0,00018 | 0,00029 | 0,00040 | 0,00053 | 0,00067 | 0,00083 | 0,00103 |
| 8 | σ (MPa) | 0,00 | 1,12 | 2,25 | 3,37 | 4,50 | 5,62 | 6,74 | 7,87 | 8,99 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00009 | 0,00019 | 0,00030 | 0,00043 | 0,00057 | 0,00073 | 0,00092 | 0,00119 |
| 9 | σ (MPa) | 0,00 | 1,12 | 2,25 | 3,37 | 4,50 | 5,62 | 6,75 | 7,87 | 9,00 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00010 | 0,00021 | 0,00034 | 0,00048 | 0,00063 | 0,00079 | 0,00099 | 0,00123 |
| 10 | σ (MPa) | 0,00 | 1,13 | 2,25 | 3,38 | 4,50 | 5,63 | 6,75 | 7,88 | 9,00 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00012 | 0,00024 | 0,00037 | 0,00051 | 0,00067 | 0,00086 | 0,00112 | 0,00154 |
| 12 | σ (MPa) | 0,00 | 1,12 | 2,23 | 3,35 | 4,46 | 5,58 | 6,70 | 7,81 | 8,93 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00009 | 0,00018 | 0,00030 | 0,00042 | 0,00056 | 0,00072 | 0,00088 | 0,00105 |
| 13 | σ (MPa) | 0,00 | 1,13 | 2,26 | 3,39 | 4,52 | 5,65 | 6,78 | 7,91 | 9,04 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00010 | 0,00021 | 0,00033 | 0,00045 | 0,00061 | 0,00079 | 0,00099 | 0,00122 |
| 14 | σ (MPa) | 0,00 | 1,12 | 2,23 | 3,35 | 4,46 | 5,58 | 6,69 | 7,81 | 8,92 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00008 | 0,00018 | 0,00030 | 0,00043 | 0,00057 | 0,00073 | 0,00091 | 0,00114 |
| 15 | σ (MPa) | 0,00 | 1,12 | 2,24 | 3,36 | 4,48 | 5,60 | 6,72 | 7,84 | 8,96 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00009 | 0,00019 | 0,00030 | 0,00041 | 0,00056 | 0,00074 | 0,00095 | 0,00126 |

Tabela D - 13 - Valores de módulo de deformação à compressão e tensão de ruptura, pelo extensômetro, para o cilindro de traço T1.

| CP | ϵ 10% (mm/mm) | ϵ 50% (mm/mm) | σ 10% (MPa) | σ 50% (MPa) | E inicial (GPa) | E tg50% (GPa) | E 10%/50% (GPa) | σ ruptura (MPa) |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|------------------|--------------------|---------------------------|
| 5 | 0,000082 | 0,0005006 | 1,12 | 5,58 | 13,33 | 8,75 | 10,66 | 11,18 |
| 6 | 0,000090 | 0,0005492 | 1,12 | 5,60 | 12,09 | 8,20 | 9,75 | 11,15 |
| 7 | 0,000082 | 0,0005288 | 1,12 | 5,58 | 12,46 | 8,47 | 10,00 | 11,35 |
| 8 | 0,000086 | 0,0005736 | 1,12 | 5,62 | 11,78 | 7,61 | 9,22 | 10,44 |
| 9 | 0,000101 | 0,0006278 | 1,12 | 5,62 | 10,65 | 7,17 | 8,54 | 10,82 |
| 10 | 0,000123 | 0,0006706 | 1,13 | 5,63 | 10,39 | 6,46 | 8,23 | 9,26 |
| 12 | 0,000088 | 0,000564 | 1,12 | 5,58 | 11,52 | 8,07 | 9,37 | 11,82 |
| 13 | 0,000101 | 0,0006128 | 1,13 | 5,65 | 11,00 | 7,27 | 8,83 | 10,50 |
| 14 | 0,000084 | 0,0005678 | 1,12 | 5,58 | 11,66 | 7,71 | 9,22 | 10,78 |
| 15 | 0,000092 | 0,0005604 | 1,12 | 5,60 | 12,15 | 7,59 | 9,56 | 10,49 |
| média | | | | | 11,70 | 7,73 | 9,34 | 10,78 |
| desvio-padrão | | | | | 0,88 | 0,67 | 0,71 | 0,69 |
| coeficiente de variação | | | | | 7,50% | 8,71% | 7,63% | 6,41% |

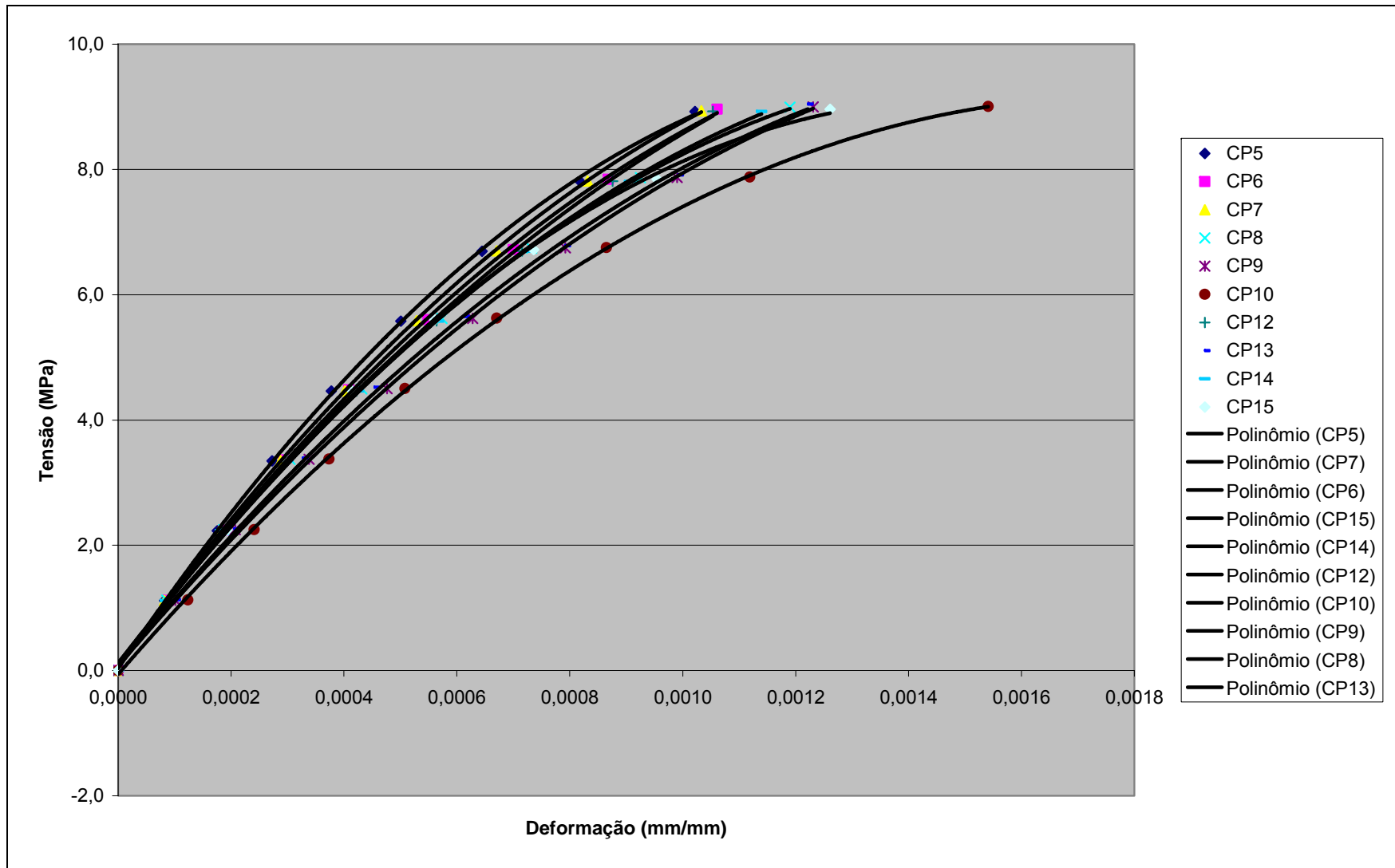


Figura D - 1 - Curvas tensão-deformação para o cilindro de tração T1.

D.2.2. Traço 2

Os resultados encontram-se apresentados da Tabela D - 14 à Tabela D - 20, e na Figura D - 2.

Tabela D - 14 - Resultados da caracterização geométrica e pesagem dos corpos-de-prova, para o cilindro de traço T2.

| CP | Altura (mm) | | | Diâmetro (mm) | | | Área (cm ²) | Volume (cm ³) | Massa (g) | δ (g/cm ³) |
|----|-------------|--------|--------|---------------|-------|-------|-------------------------|---------------------------|-----------|-------------------------------|
| | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | | | | |
| 1 | 98,73 | 98,71 | 98,72 | 49,90 | 49,90 | 49,90 | 19,56 | 193,06 | 346,19 | 1,79 |
| 2 | 99,21 | 99,23 | 99,22 | 49,59 | 49,73 | 49,66 | 19,37 | 192,18 | 345,15 | 1,80 |
| 3 | 99,36 | 99,30 | 99,33 | 49,79 | 49,71 | 49,75 | 19,44 | 193,09 | 347,73 | 1,80 |
| 4 | 99,09 | 99,09 | 99,09 | 49,99 | 49,95 | 49,97 | 19,61 | 194,33 | 347,71 | 1,79 |
| 5 | 99,36 | 99,23 | 99,30 | 49,87 | 49,88 | 49,88 | 19,54 | 193,99 | 348,58 | 1,80 |
| 6 | 99,81 | 99,54 | 99,68 | 49,79 | 49,74 | 49,77 | 19,45 | 193,88 | 347,65 | 1,79 |
| 7 | 99,07 | 99,03 | 99,05 | 49,80 | 49,80 | 49,80 | 19,48 | 192,93 | 347,29 | 1,80 |
| 8 | 99,84 | 99,77 | 99,81 | 49,51 | 49,57 | 49,54 | 19,28 | 192,38 | 348,15 | 1,81 |
| 9 | 99,70 | 99,57 | 99,64 | 49,76 | 49,89 | 49,83 | 19,50 | 194,27 | 350,45 | 1,80 |
| 10 | 99,50 | 99,56 | 99,53 | 49,90 | 49,87 | 49,89 | 19,54 | 194,53 | 348,81 | 1,79 |
| 11 | 98,52 | 98,88 | 98,70 | 49,74 | 49,72 | 49,73 | 19,42 | 191,71 | 345,20 | 1,80 |
| 12 | 99,22 | 99,34 | 99,28 | 49,73 | 49,70 | 49,72 | 19,41 | 192,72 | 345,31 | 1,79 |
| 13 | 99,64 | 99,71 | 99,68 | 49,89 | 49,84 | 49,87 | 19,53 | 194,66 | 348,32 | 1,79 |
| 14 | 99,81 | 99,74 | 99,78 | 49,87 | 49,95 | 49,91 | 19,56 | 195,20 | 349,18 | 1,79 |
| 15 | 99,45 | 99,58 | 99,52 | 49,72 | 49,77 | 49,75 | 19,44 | 193,41 | 346,60 | 1,79 |
| 16 | 98,95 | 98,94 | 98,95 | 49,77 | 49,90 | 49,84 | 19,51 | 193,00 | 346,01 | 1,79 |
| 17 | 99,84 | 99,91 | 99,88 | 49,51 | 49,54 | 49,53 | 19,26 | 192,40 | 346,42 | 1,80 |
| 18 | 99,65 | 99,56 | 99,61 | 49,94 | 49,80 | 49,87 | 19,53 | 194,56 | 346,41 | 1,78 |
| 19 | 100,13 | 100,26 | 100,20 | 49,78 | 49,87 | 49,83 | 19,50 | 195,36 | 349,99 | 1,79 |
| 20 | 99,47 | 99,36 | 99,42 | 49,83 | 49,82 | 49,83 | 19,50 | 193,84 | 346,88 | 1,79 |

Tabela D - 15 - Resultados do ensaio de módulo de deformação pelo ultrassom, para o cilindro de traço T2.

| CP | Tempo (µs) | Velocidade (km/s) | E (GPa) |
|-------------------------|------------|-------------------|---------|
| 1 | 60,6 | 1,63 | 4,28 |
| 2 | 59,5 | 1,67 | 4,49 |
| 3 | 60,3 | 1,65 | 4,40 |
| 4 | 61,2 | 1,62 | 4,22 |
| 5 | 59,5 | 1,67 | 4,50 |
| 6 | 61,4 | 1,62 | 4,25 |
| 7 | 61,1 | 1,62 | 4,26 |
| 8 | 60,6 | 1,65 | 4,42 |
| 9 | 59,5 | 1,67 | 4,55 |
| 10 | 60,0 | 1,66 | 4,44 |
| 11 | 57,8 | 1,71 | 4,73 |
| 12 | 59,8 | 1,66 | 4,44 |
| 13 | 58,5 | 1,70 | 4,68 |
| 14 | 59,7 | 1,67 | 4,50 |
| 15 | 60,8 | 1,64 | 4,32 |
| 16 | 60,5 | 1,64 | 4,32 |
| 17 | 60,5 | 1,65 | 4,42 |
| 18 | 61,3 | 1,62 | 4,23 |
| 19 | 60,1 | 1,67 | 4,48 |
| 20 | 58,8 | 1,69 | 4,60 |
| média | | | 4,43 |
| desvio-padrão | | | 0,15 |
| coeficiente de variação | | | 3,29% |

Tabela D - 16 - Resultados do ensaio de resistência à compressão realizado na prensa EMIC, para o cilindro de traço T2.

| CP | Carga de ruptura (N) | σ ruptura (MPa) |
|----------|----------------------|------------------------|
| 1 | 5939 | 3,04 |
| 2 | 6307 | 3,26 |
| 3 | 6170 | 3,17 |
| 5 | 5845 | 2,99 |
| média | 6065 | 3,11 |
| desv pad | 211 | 0,12 |
| coef var | 3,48% | 3,92% |

Tabela D - 17 - Resultados do ensaio de resistência à compressão realizado na prensa do IPT, para o cilindro de traço T2.

| CP | Carga de ruptura (N) | σ ruptura (MPa) |
|----------|----------------------|------------------------|
| 19 | 6160 | 3,16 |
| 20 | 7620 | 3,91 |
| média | 6890 | 3,53 |
| desv pad | 1032 | 0,53 |
| coef var | 14,98% | 14,98% |

Tabela D - 18 - Medidas de deslocamento, fornecidas pelo extensômetro, e de carga máxima atingida para o ensaio de módulo de deformação à compressão, para o cilindro de traço T2.

| CP | L0% (mm) | L10% (mm) | L20% (mm) | L30% (mm) | L40% (mm) | L50% (mm) | L60% (mm) | L70% (mm) | L80% (mm) | Fmax (kN) |
|----|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 7 | 0,00149 | 0,00374 | 0,00747 | 0,01130 | 0,01522 | 0,01989 | 0,02587 | 0,03288 | 0,04203 | 5,78 |
| 6 | 0,00047 | 0,00252 | 0,00654 | 0,01046 | 0,01448 | 0,01952 | 0,02578 | 0,03390 | 0,04511 | 5,94 |
| 9 | 0,00149 | 0,00308 | 0,00785 | 0,01158 | 0,01578 | 0,02101 | 0,02765 | 0,03633 | 0,04801 | 6,31 |
| 10 | 0,00084 | 0,00280 | 0,00635 | 0,00971 | 0,01308 | 0,01691 | 0,02176 | 0,02737 | 0,03344 | 6,52 |
| 11 | 0,00084 | 0,00196 | 0,00691 | 0,01074 | 0,01485 | 0,01971 | 0,02578 | 0,03381 | 0,04436 | 6,09 |
| 12 | 0,00065 | 0,00224 | 0,00607 | 0,00953 | 0,01289 | 0,01700 | 0,02186 | 0,02755 | 0,03456 | 6,28 |
| 13 | 0,00187 | 0,00355 | 0,00887 | 0,01280 | 0,01672 | 0,02148 | 0,02681 | 0,03316 | 0,04100 | 6,21 |
| 15 | 0,00093 | 0,00112 | 0,00616 | 0,00953 | 0,01308 | 0,01728 | 0,02214 | 0,02802 | 0,03409 | 6,43 |
| 16 | 0,00121 | 0,00159 | 0,00803 | 0,01167 | 0,01550 | 0,01999 | 0,02522 | 0,03129 | 0,03773 | 6,28 |
| 17 | 0,00084 | 0,00112 | 0,00710 | 0,01102 | 0,01513 | 0,02008 | 0,02596 | 0,03288 | 0,04091 | 5,87 |

Carga de ruptura estimada: 6000N

Tabela D - 19 - Resultados de tensão e deformação para o ensaio de módulo de deformação à compressão, para o cilindro de traço T2.

| CP | % da carga de ruptura | 0% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% |
|----|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Força (N) | 0 | 600 | 1200 | 1800 | 2400 | 3000 | 3600 | 4200 | 4800 |
| 7 | σ (MPa) | 0,00 | 0,31 | 0,62 | 0,92 | 1,23 | 1,54 | 1,85 | 2,16 | 2,46 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00005 | 0,00012 | 0,00020 | 0,00027 | 0,00037 | 0,00049 | 0,00063 | 0,00081 |
| 6 | σ (MPa) | 0,00 | 0,31 | 0,62 | 0,93 | 1,23 | 1,54 | 1,85 | 2,16 | 2,47 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00004 | 0,00012 | 0,00020 | 0,00028 | 0,00038 | 0,00051 | 0,00067 | 0,00089 |
| 9 | σ (MPa) | 0,00 | 0,31 | 0,62 | 0,92 | 1,23 | 1,54 | 1,85 | 2,15 | 2,46 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00003 | 0,00013 | 0,00020 | 0,00029 | 0,00039 | 0,00052 | 0,00070 | 0,00093 |
| 10 | σ (MPa) | 0,00 | 0,31 | 0,61 | 0,92 | 1,23 | 1,53 | 1,84 | 2,15 | 2,46 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00004 | 0,00011 | 0,00018 | 0,00024 | 0,00032 | 0,00042 | 0,00053 | 0,00065 |
| 11 | σ (MPa) | 0,00 | 0,31 | 0,62 | 0,93 | 1,24 | 1,54 | 1,85 | 2,16 | 2,47 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00002 | 0,00012 | 0,00020 | 0,00028 | 0,00038 | 0,00050 | 0,00066 | 0,00087 |
| 12 | σ (MPa) | 0,00 | 0,31 | 0,62 | 0,93 | 1,24 | 1,55 | 1,85 | 2,16 | 2,47 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00003 | 0,00011 | 0,00018 | 0,00024 | 0,00033 | 0,00042 | 0,00054 | 0,00068 |
| 13 | σ (MPa) | 0,00 | 0,31 | 0,61 | 0,92 | 1,23 | 1,54 | 1,84 | 2,15 | 2,46 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00003 | 0,00014 | 0,00022 | 0,00030 | 0,00039 | 0,00050 | 0,00063 | 0,00078 |
| 15 | σ (MPa) | 0,00 | 0,31 | 0,62 | 0,93 | 1,23 | 1,54 | 1,85 | 2,16 | 2,47 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00000 | 0,00010 | 0,00017 | 0,00024 | 0,00033 | 0,00042 | 0,00054 | 0,00066 |
| 16 | σ (MPa) | 0,00 | 0,31 | 0,62 | 0,92 | 1,23 | 1,54 | 1,85 | 2,15 | 2,46 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00001 | 0,00014 | 0,00021 | 0,00029 | 0,00038 | 0,00048 | 0,00060 | 0,00073 |
| 17 | σ (MPa) | 0,00 | 0,31 | 0,62 | 0,93 | 1,25 | 1,56 | 1,87 | 2,18 | 2,49 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00001 | 0,00013 | 0,00020 | 0,00029 | 0,00038 | 0,00050 | 0,00064 | 0,00080 |

Tabela D - 20 - Valores de módulo de deformação à compressão e tensão de ruptura, pelo extensômetro, para o cilindro de traço T2.

| CP | ϵ 10% (mm/mm) | ϵ 50% (mm/mm) | σ 10% (MPa) | σ 50% (MPa) | Einicial (GPa) | E tg50% (GPa) | E 10%/50% (GPa) | σ ruptura (MPa) |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------|--------------------|---------------------------|
| 7 | 0,000045 | 0,000368 | 0,31 | 1,54 | 4,91 | 3,13 | 3,81 | 2,97 |
| 6 | 0,000041 | 0,000381 | 0,31 | 1,54 | 4,74 | 2,97 | 3,63 | 3,05 |
| 9 | 0,0000318 | 0,0003904 | 0,31 | 1,54 | 4,52 | 2,85 | 3,43 | 3,24 |
| 10 | 0,0000392 | 0,0003214 | 0,31 | 1,53 | 5,49 | 3,70 | 4,35 | 3,34 |
| 11 | 0,0000224 | 0,0003774 | 0,31 | 1,54 | 4,63 | 2,96 | 3,48 | 3,14 |
| 12 | 0,0000318 | 0,000327 | 0,31 | 1,55 | 5,43 | 3,60 | 4,19 | 3,24 |
| 13 | 0,0000336 | 0,0003922 | 0,31 | 1,54 | 4,42 | 3,06 | 3,43 | 3,18 |
| 15 | 0,0000038 | 0,000327 | 0,31 | 1,54 | 5,00 | 3,52 | 3,82 | 3,29 |
| 16 | 0,0000076 | 0,0003756 | 0,31 | 1,54 | 4,25 | 3,19 | 3,34 | 3,23 |
| 17 | 0,0000056 | 0,0003848 | 0,31 | 1,56 | 4,33 | 2,99 | 3,29 | 3,01 |
| média | | | | | 4,77 | 3,20 | 3,68 | 3,17 |
| desvio-padrão | | | | | 0,43 | 0,30 | 0,36 | 0,12 |
| coeficiente de variação | | | | | 9,08% | 9,41% | 9,86% | 3,87% |

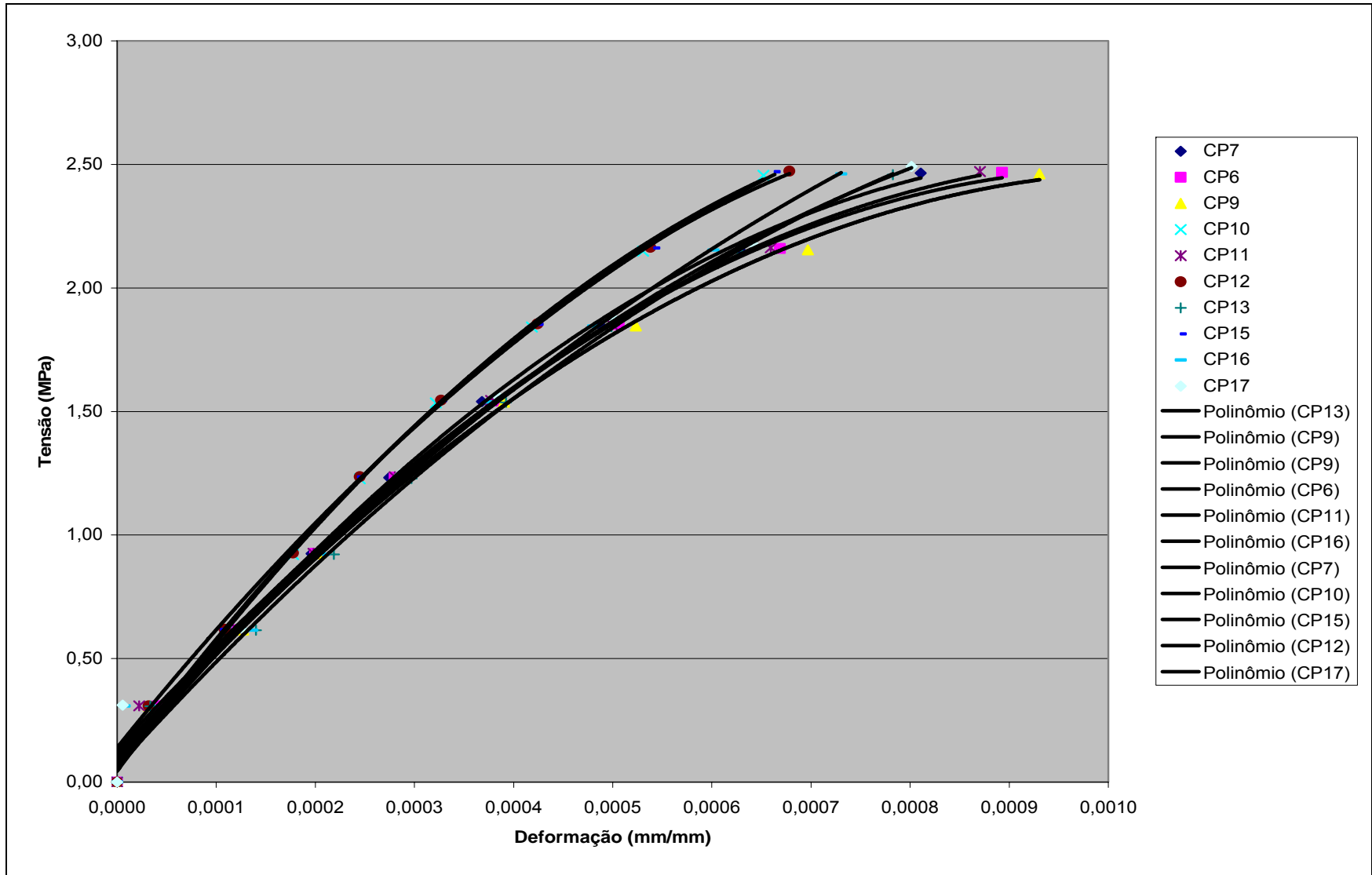


Figura D - 2 - Curvas tensão-deformação para o cilindro de tração T2.

D.3. Cubo

D.3.1. Traço 1

Os resultados encontram-se apresentados da Tabela D - 21 à Tabela D - 26, e da Figura D - 3 à Figura D - 5.

Tabela D - 21 - Resultados da caracterização geométrica e pesagem dos corpos-de-prova, para o cubo de traço T1.

| CP | L1 (mm) | | | L2 (mm) | | | L3 (mm) | | | Área L1xL3 (cm ²) | Volume (cm ³) | Massa (g) | δ (g/cm ³) |
|----|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|-------------------------------|---------------------------|-----------|-------------------------------|
| | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | | | | |
| 1 | 101,17 | 101,94 | 101,56 | 100,70 | 101,06 | 100,88 | 99,95 | 99,52 | 99,74 | 101,29 | 1021,77 | 1962,24 | 1,92 |
| 2 | 102,28 | 102,41 | 102,35 | 99,89 | 99,31 | 99,60 | 99,94 | 100,46 | 100,20 | 102,55 | 1021,39 | 1940,83 | 1,90 |
| 3 | 99,92 | 99,79 | 99,86 | 100,00 | 99,79 | 99,90 | 100,88 | 100,63 | 100,76 | 100,61 | 1005,03 | 1944,46 | 1,93 |
| 4 | 99,74 | 100,08 | 99,91 | 101,06 | 100,18 | 100,62 | 99,68 | 99,94 | 99,81 | 99,72 | 1003,38 | 1908,78 | 1,90 |
| 5 | 101,63 | 101,06 | 101,35 | 99,94 | 100,15 | 100,05 | 100,95 | 100,54 | 100,75 | 102,10 | 1021,46 | 1961,26 | 1,92 |
| 6 | 102,23 | 102,42 | 102,33 | 99,87 | 99,11 | 99,49 | 99,85 | 100,04 | 99,95 | 102,27 | 1017,47 | 1960,15 | 1,93 |
| 7 | 100,04 | 100,14 | 100,09 | 100,77 | 100,84 | 100,81 | 99,53 | 99,19 | 99,36 | 99,45 | 1002,50 | 1906,11 | 1,90 |
| 8 | 101,73 | 100,78 | 101,26 | 100,48 | 100,24 | 100,36 | 99,05 | 98,61 | 98,83 | 100,07 | 1004,31 | 1933,80 | 1,93 |
| 9 | 98,97 | 98,38 | 98,68 | 101,55 | 101,30 | 101,43 | 100,30 | 99,53 | 99,92 | 98,59 | 999,96 | 1923,49 | 1,92 |
| 10 | 99,79 | 99,58 | 99,69 | 100,46 | 100,40 | 100,43 | 100,25 | 99,95 | 100,10 | 99,78 | 1002,14 | 1952,38 | 1,95 |
| 11 | 101,95 | 101,80 | 101,88 | 100,28 | 100,26 | 100,27 | 101,05 | 100,68 | 100,87 | 102,76 | 1030,34 | 1968,56 | 1,91 |
| 12 | 99,83 | 100,39 | 100,11 | 100,53 | 100,41 | 100,47 | 100,51 | 101,10 | 100,81 | 100,92 | 1013,90 | 1919,71 | 1,89 |
| 13 | 99,40 | 99,16 | 99,28 | 100,54 | 100,36 | 100,45 | 101,04 | 100,92 | 100,98 | 100,25 | 1007,04 | 1931,75 | 1,92 |
| 14 | 99,03 | 99,24 | 99,14 | 100,05 | 99,69 | 99,87 | 100,11 | 100,04 | 100,08 | 99,21 | 990,80 | 1907,65 | 1,93 |
| 15 | 98,85 | 99,47 | 99,16 | 100,42 | 100,32 | 100,37 | 99,79 | 99,96 | 99,88 | 99,04 | 994,02 | 1906,85 | 1,92 |
| 16 | 99,52 | 99,82 | 99,67 | 100,19 | 99,95 | 100,07 | 100,16 | 100,35 | 100,26 | 99,92 | 999,94 | 1922,51 | 1,92 |
| 17 | 100,62 | 100,75 | 100,69 | 99,87 | 99,88 | 99,88 | 99,27 | 98,78 | 99,03 | 99,70 | 995,79 | 1919,43 | 1,93 |
| 18 | 101,74 | 101,88 | 101,81 | 100,33 | 100,44 | 100,39 | 99,81 | 99,84 | 99,83 | 101,63 | 1020,23 | 1951,57 | 1,91 |
| 19 | 101,30 | 101,42 | 101,36 | 100,30 | 99,99 | 100,15 | 100,22 | 100,04 | 100,13 | 101,49 | 1016,39 | 1962,02 | 1,93 |
| 20 | 100,30 | 99,84 | 100,07 | 100,41 | 99,34 | 99,88 | 99,63 | 99,66 | 99,65 | 99,71 | 995,90 | 1901,15 | 1,91 |
| 21 | 101,30 | 101,52 | 101,41 | 100,15 | 99,92 | 100,04 | 100,01 | 100,16 | 100,09 | 101,50 | 1015,32 | 1945,83 | 1,92 |
| 22 | 102,31 | 101,45 | 101,88 | 100,04 | 99,85 | 99,95 | 98,27 | 97,90 | 98,09 | 99,93 | 998,74 | 1920,67 | 1,92 |
| 23 | 100,99 | 101,31 | 101,15 | 100,39 | 100,01 | 100,20 | 99,93 | 100,46 | 100,20 | 101,35 | 1015,50 | 1962,09 | 1,93 |

Tabela D - 22 - Resultados do ensaio de resistência à compressão realizado na prensa do IPT, para o cubo de traço T1.

| CP | Carga de ruptura (N) | σ ruptura (MPa) |
|----|-------------------------|------------------------|
| 1 | 150080 | 14,82 |
| 3 | 179440 | 17,84 |
| 2 | 161820 | 15,78 |
| | média | 16,14 |
| | desvio-padrão | 1,54 |
| | coeficiente de variação | 9,55% |

Tabela D - 23 - Medidas de deslocamento, fornecidas pelo extensômetro, para o ensaio de módulo de deformação à compressão, para o cubo de traço T1.

| CP | L0% (mm) | L10% (mm) | L20% (mm) | L30% (mm) | L40% (mm) | L50% (mm) | L60% (mm) |
|----|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 8 | 0,00168 | 0,00570 | 0,01158 | 0,01877 | 0,02755 | 0,03857 | 0,05137 |
| 9 | 0,00271 | 0,00831 | 0,01550 | 0,02298 | 0,03185 | 0,04306 | 0,05669 |
| 10 | 0,00280 | 0,00962 | 0,01541 | 0,02092 | 0,02811 | 0,04194 | 0,06220 |
| 11 | 0,00140 | 0,00430 | 0,00775 | 0,01252 | 0,01961 | 0,03063 | 0,04259 |
| 12 | 0,00065 | 0,00187 | 0,00532 | 0,01102 | 0,01905 | 0,02989 | 0,04287 |
| 14 | 0,00168 | 0,00654 | 0,01354 | 0,02064 | 0,02905 | 0,03951 | 0,05128 |
| 15 | 0,00121 | 0,00308 | 0,00841 | 0,01541 | 0,02391 | 0,03493 | 0,04829 |
| 16 | 0,00075 | 0,00149 | 0,00616 | 0,01280 | 0,02120 | 0,03232 | 0,04577 |
| 19 | 0,00467 | 0,01504 | 0,02466 | 0,03437 | 0,04642 | 0,06127 | 0,07715 |
| 21 | 0,00392 | 0,01597 | 0,02587 | 0,03437 | 0,04446 | 0,05669 | 0,07117 |

Carga de ruptura estimada: 156000N (média desconsiderando o valor de 17,84MPa de resistência mecânica, por ser um valor muito alto).

Tabela D - 24 - Resultados de tensão e deformação para o ensaio de módulo de deformação à compressão, para o cubo de traço T1.

| CP | % da carga de ruptura | 0% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% |
|----|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Força (N) | 0 | 15600 | 31200 | 46800 | 62400 | 78000 | 93600 |
| 8 | σ (MPa) | 0,00 | 1,56 | 3,12 | 4,68 | 6,24 | 7,79 | 9,35 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00008 | 0,00020 | 0,00034 | 0,00052 | 0,00074 | 0,00099 |
| 9 | σ (MPa) | 0,00 | 1,58 | 3,16 | 4,75 | 6,33 | 7,91 | 9,49 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00011 | 0,00026 | 0,00041 | 0,00058 | 0,00081 | 0,00108 |
| 10 | σ (MPa) | 0,00 | 1,56 | 3,13 | 4,69 | 6,25 | 7,82 | 9,38 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00014 | 0,00025 | 0,00036 | 0,00051 | 0,00078 | 0,00119 |
| 11 | σ (MPa) | 0,00 | 1,52 | 3,04 | 4,55 | 6,07 | 7,59 | 9,11 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00006 | 0,00013 | 0,00022 | 0,00036 | 0,00058 | 0,00082 |
| 12 | σ (MPa) | 0,00 | 1,55 | 3,09 | 4,64 | 6,18 | 7,73 | 9,28 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00002 | 0,00009 | 0,00021 | 0,00037 | 0,00058 | 0,00084 |
| 14 | σ (MPa) | 0,00 | 1,57 | 3,14 | 4,72 | 6,29 | 7,86 | 9,43 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00010 | 0,00024 | 0,00038 | 0,00055 | 0,00076 | 0,00099 |
| 15 | σ (MPa) | 0,00 | 1,58 | 3,15 | 4,73 | 6,30 | 7,88 | 9,45 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00004 | 0,00014 | 0,00028 | 0,00045 | 0,00067 | 0,00094 |
| 16 | σ (MPa) | 0,00 | 1,56 | 3,12 | 4,68 | 6,24 | 7,81 | 9,37 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00001 | 0,00011 | 0,00024 | 0,00041 | 0,00063 | 0,00090 |
| 19 | σ (MPa) | 0,00 | 1,54 | 3,07 | 4,61 | 6,15 | 7,69 | 9,22 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00021 | 0,00040 | 0,00059 | 0,00084 | 0,00113 | 0,00145 |
| 21 | σ (MPa) | 0,00 | 1,54 | 3,07 | 4,61 | 6,15 | 7,69 | 9,22 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00024 | 0,00044 | 0,00061 | 0,00081 | 0,00106 | 0,00135 |

Tabela D - 25 - Resultados de tensão e deformação, obtidos com os relógios comparadores, para o ensaio de módulo de deformação à compressão, para o cubo de traço T1.

| CP | % da carga de rupt. | 0% | | 10% | | 20% | | 30% | | 40% | | 50% | | 60% | |
|----|-----------------------------|---------|--------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| 8 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,215 | 0,251 | 0,294 | 0,467 | 0,337 | 0,491 | 0,359 | 0,505 | 0,376 | 0,523 | 0,397 | 0,547 | 0,420 | 0,576 |
| | Lx% - L0% (mm) | - | - | 0,079 | 0,216 | 0,122 | 0,240 | 0,144 | 0,254 | 0,161 | 0,272 | 0,182 | 0,296 | 0,205 | 0,325 |
| | ε médio (mm/mm) | 0,00000 | | 0,00147 | | 0,00180 | | 0,00198 | | 0,00216 | | 0,00238 | | 0,00264 | |
| | σ (MPa) | 0,000 | | 1,559 | | 3,118 | | 4,677 | | 6,236 | | 7,795 | | 9,353 | |
| 9 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,362 | 0,060 | 0,492 | 0,193 | 0,542 | 0,213 | 0,566 | 0,223 | 0,594 | 0,233 | 0,630 | 0,247 | 0,670 | 0,260 |
| | Lx% - L0% (mm) | - | - | 0,130 | 0,133 | 0,180 | 0,153 | 0,204 | 0,163 | 0,232 | 0,173 | 0,268 | 0,187 | 0,308 | 0,200 |
| | ε médio (mm/mm) | 0,00000 | | 0,00130 | | 0,00164 | | 0,00181 | | 0,00200 | | 0,00224 | | 0,00250 | |
| | σ (MPa) | 0,000 | | 1,582 | | 3,165 | | 4,747 | | 6,329 | | 7,911 | | 9,494 | |
| 10 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,248 | 0,315 | 0,375 | 0,462 | 0,433 | 0,489 | 0,461 | 0,503 | 0,495 | 0,526 | 0,533 | 0,594 | 0,563 | 0,688 |
| | Lx% - L0% (mm) | - | - | 0,127 | 0,147 | 0,185 | 0,174 | 0,213 | 0,188 | 0,247 | 0,211 | 0,285 | 0,279 | 0,315 | 0,373 |
| | ε médio (mm/mm) | 0,00000 | | 0,00136 | | 0,00179 | | 0,00200 | | 0,00228 | | 0,00281 | | 0,00343 | |
| | σ (MPa) | 0,000 | | 1,563 | | 3,127 | | 4,690 | | 6,253 | | 7,817 | | 9,380 | |
| 11 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,467 | 0,043 | 0,640 | 0,252 | 0,692 | 0,275 | 0,726 | 0,290 | 0,771 | 0,303 | 0,826 | 0,321 | 0,882 | 0,342 |
| | Lx% - L0% (mm) | - | - | 0,173 | 0,209 | 0,225 | 0,232 | 0,259 | 0,247 | 0,304 | 0,260 | 0,359 | 0,278 | 0,415 | 0,299 |
| | ε médio (mm/mm) | 0,00000 | | 0,00190 | | 0,00228 | | 0,00252 | | 0,00281 | | 0,00318 | | 0,00356 | |
| | σ (MPa) | 0,000 | | 1,518 | | 3,036 | | 4,554 | | 6,073 | | 7,591 | | 9,109 | |
| 12 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,250 | 0,001 | 0,370 | 0,170 | 0,421 | 0,191 | 0,447 | 0,204 | 0,478 | 0,217 | 0,516 | 0,232 | 0,557 | 0,246 |
| | Lx% - L0% (mm) | - | - | 0,120 | 0,169 | 0,171 | 0,190 | 0,197 | 0,203 | 0,228 | 0,216 | 0,266 | 0,231 | 0,307 | 0,245 |
| | ε médio (mm/mm) | 0,00000 | | 0,00144 | | 0,00180 | | 0,00199 | | 0,00221 | | 0,00247 | | 0,00275 | |
| | σ (MPa) | 0,000 | | 1,546 | | 3,092 | | 4,638 | | 6,183 | | 7,729 | | 9,275 | |
| 14 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,175 | 0,068 | 0,290 | 0,238 | 0,339 | 0,262 | 0,361 | 0,277 | 0,382 | 0,296 | 0,406 | 0,320 | 0,441 | 0,350 |
| | Lx% - L0% (mm) | - | - | 0,115 | 0,170 | 0,164 | 0,194 | 0,186 | 0,209 | 0,207 | 0,228 | 0,231 | 0,252 | 0,266 | 0,282 |
| | ε médio (mm/mm) | 0,00000 | | 0,00143 | | 0,00179 | | 0,00198 | | 0,00218 | | 0,00242 | | 0,00274 | |
| | σ (MPa) | 0,000 | | 1,572 | | 3,145 | | 4,717 | | 6,290 | | 7,862 | | 9,435 | |
| 15 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,273 | 0,174 | 0,445 | 0,335 | 0,488 | 0,361 | 0,513 | 0,378 | 0,539 | 0,398 | 0,572 | 0,418 | 0,609 | 0,438 |
| | Lx% - L0% (mm) | - | - | 0,172 | 0,161 | 0,215 | 0,187 | 0,240 | 0,204 | 0,266 | 0,224 | 0,299 | 0,244 | 0,336 | 0,264 |
| | ε médio (mm/mm) | 0,00000 | | 0,00166 | | 0,00200 | | 0,00221 | | 0,00244 | | 0,00270 | | 0,00299 | |
| | σ (MPa) | 0,000 | | 1,575 | | 3,150 | | 4,726 | | 6,301 | | 7,876 | | 9,451 | |
| 16 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,114 | 0,173 | 0,239 | 0,309 | 0,286 | 0,338 | 0,307 | 0,354 | 0,330 | 0,370 | 0,360 | 0,388 | 0,397 | 0,404 |
| | Lx% - L0% (mm) | - | - | 0,125 | 0,136 | 0,172 | 0,165 | 0,193 | 0,181 | 0,216 | 0,197 | 0,246 | 0,215 | 0,283 | 0,231 |
| | ε médio (mm/mm) | 0,00000 | | 0,00130 | | 0,00168 | | 0,00187 | | 0,00206 | | 0,00230 | | 0,00257 | |
| | σ (MPa) | 0,000 | | 1,561 | | 3,122 | | 4,684 | | 6,245 | | 7,806 | | 9,367 | |
| 19 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,333 | 0,276 | 0,428 | 0,454 | 0,477 | 0,493 | 0,509 | 0,522 | 0,544 | 0,557 | 0,581 | 0,595 | 0,619 | 0,632 |
| | Lx% - L0% (mm) | - | - | 0,095 | 0,178 | 0,144 | 0,217 | 0,176 | 0,246 | 0,211 | 0,281 | 0,248 | 0,319 | 0,286 | 0,356 |
| | ε médio (mm/mm) | 0,00000 | | 0,00136 | | 0,00180 | | 0,00211 | | 0,00246 | | 0,00283 | | 0,00321 | |
| | σ (MPa) | 0,000 | | 1,537 | | 3,074 | | 4,611 | | 6,148 | | 7,685 | | 9,222 | |
| 21 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,264 | -0,011 | 0,422 | 0,223 | 0,463 | 0,244 | 0,488 | 0,259 | 0,516 | 0,277 | 0,551 | 0,296 | 0,593 | 0,315 |
| | Lx% - L0% (mm) | - | - | 0,158 | 0,234 | 0,199 | 0,255 | 0,224 | 0,270 | 0,252 | 0,288 | 0,287 | 0,307 | 0,329 | 0,326 |
| | ε médio (mm/mm) | 0,00000 | | 0,00196 | | 0,00227 | | 0,00247 | | 0,00270 | | 0,00297 | | 0,00327 | |
| | σ (MPa) | 0,000 | | 1,537 | | 3,074 | | 4,611 | | 6,148 | | 7,685 | | 9,222 | |

Tabela D - 26 - Valores de módulo de deformação à compressão para o cubo de traço T1.

| CP | Extensômetro | | | | | | Rel. comparadores | | |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|-----------------|---------------|-------------------|---------------------------|---------------|
| | ε 10% (mm/mm) | ε 50% (mm/mm) | σ 10% (MPa) | σ 50% (MPa) | E inicial (GPa) | E tg50% (GPa) | E 10%/50% (GPa) | ε 50% (mm/mm) | E tg50% (GPa) |
| 8 | 0,00008 | 0,00074 | 1,56 | 7,79 | 14,64 | 6,33 | 9,49 | 0,00238 | 6,66 |
| 9 | 0,00011 | 0,00081 | 1,58 | 7,91 | 13,12 | 6,49 | 9,11 | 0,00224 | 6,34 |
| 10 | 0,00014 | 0,00078 | 1,56 | 7,82 | 15,17 | 5,71 | 9,67 | 0,00281 | - |
| 11 | 0,00006 | 0,00058 | 1,52 | 7,59 | 20,03 | 6,30 | 11,53 | 0,00318 | - |
| 12 | 0,00002 | 0,00058 | 1,55 | 7,73 | 18,94 | 6,21 | 11,03 | 0,00247 | 5,79 |
| 14 | 0,00010 | 0,00076 | 1,57 | 7,86 | 13,68 | 7,02 | 9,54 | 0,00242 | 5,81 |
| 15 | 0,00004 | 0,00067 | 1,58 | 7,88 | 16,14 | 6,24 | 9,89 | 0,00270 | 5,79 |
| 16 | 0,00001 | 0,00063 | 1,56 | 7,81 | 16,94 | 6,14 | 10,13 | 0,00230 | 6,30 |
| 19 | 0,00021 | 0,00113 | 1,54 | 7,69 | - | - | - | 0,00283 | - |
| 21 | 0,00024 | 0,00106 | 1,54 | 7,69 | - | - | - | 0,00297 | 5,41 |
| média | | | | | 16,08 | 6,31 | 10,05 | 0,00 | 6,01 |
| desvio-padrão | | | | | 2,45 | 0,37 | 0,83 | 0,00 | 0,43 |
| coeficiente de variação | | | | | 15,21% | 5,82% | 8,25% | 11,88% | 7,14% |

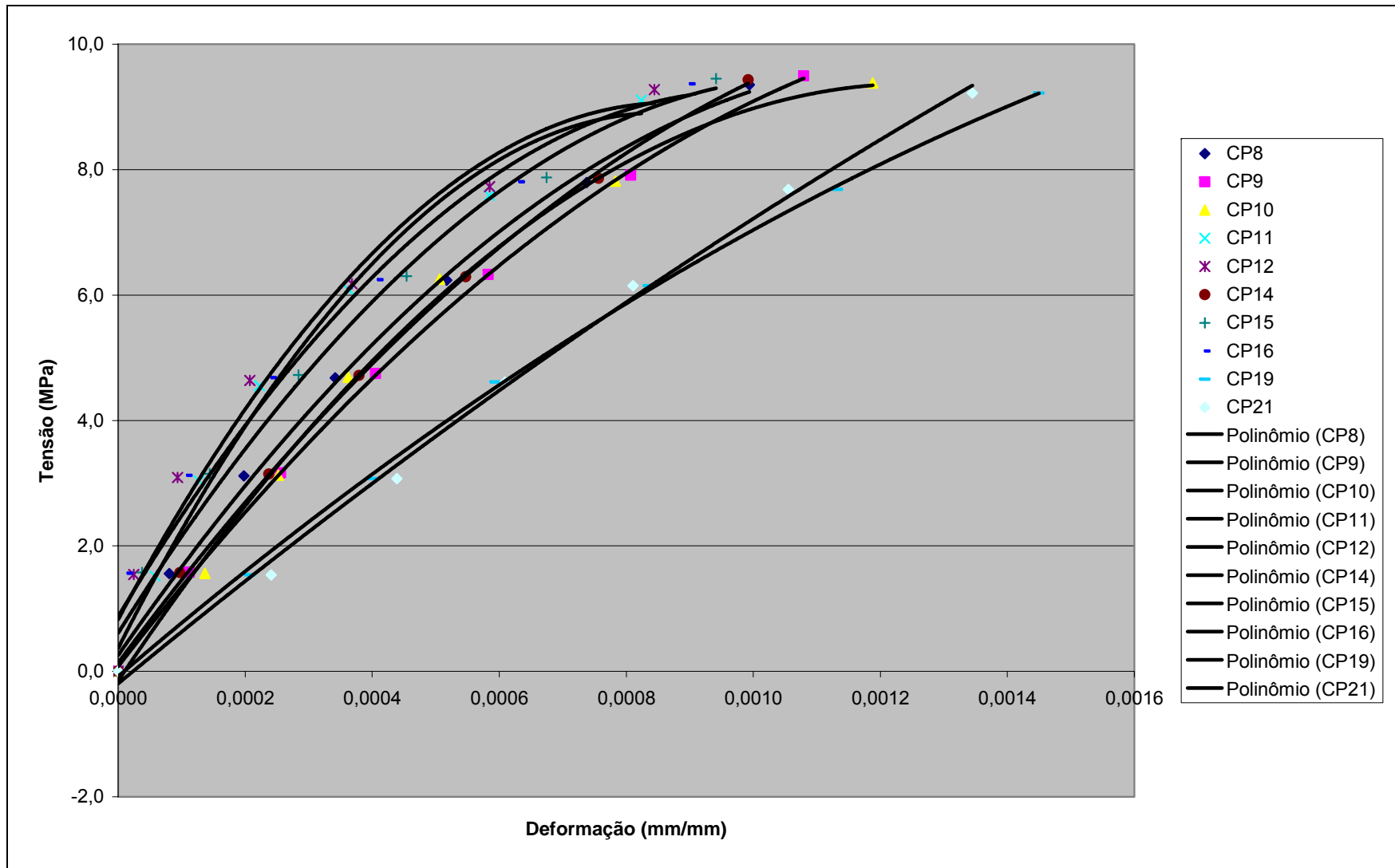


Figura D - 3 - Curvas tensão-deformação, pelo extensômetro, para o cubo de traço T1.

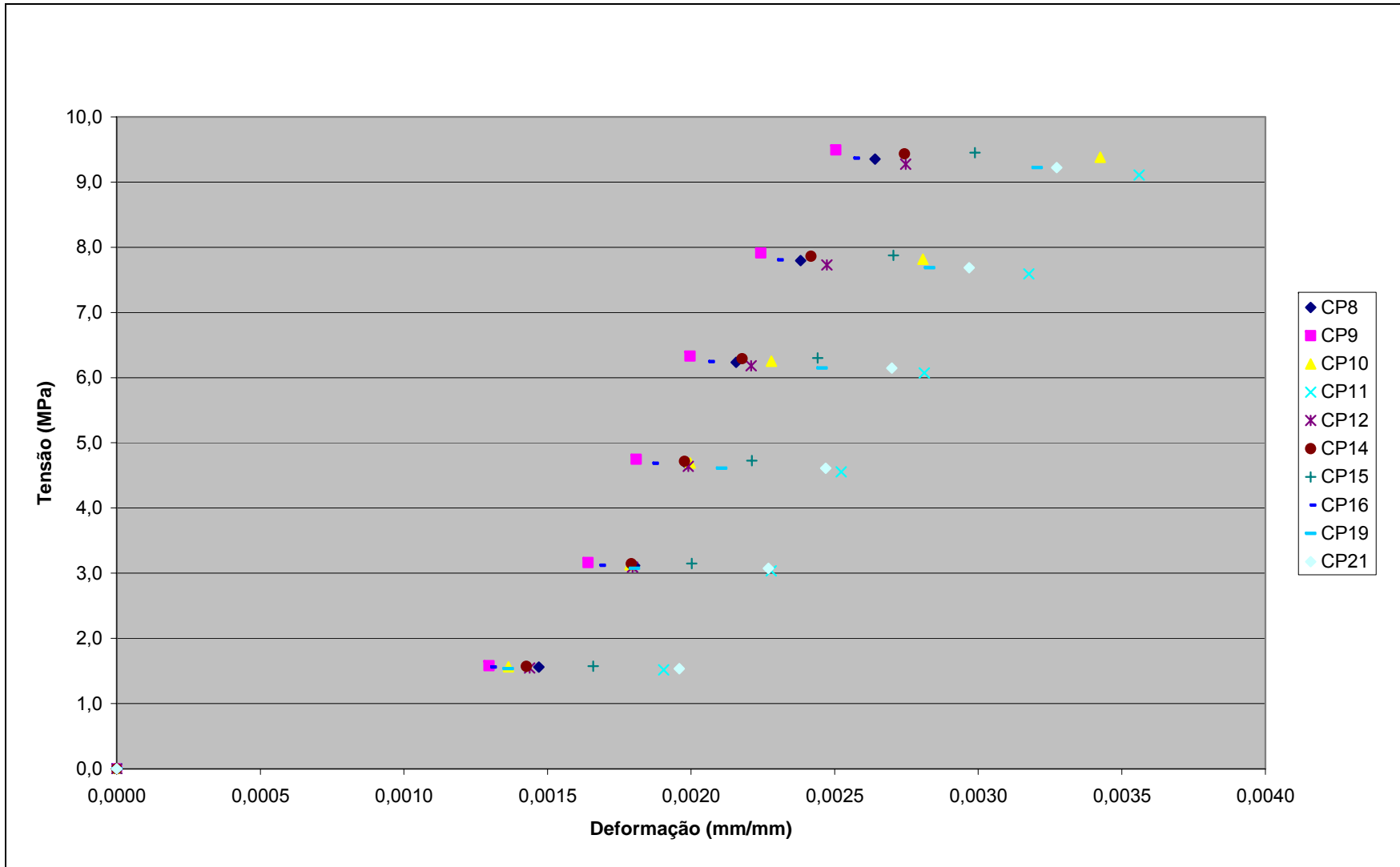


Figura D - 4 - Pares tensão-deformação, pelos relógios comparadores, para o cubo de traço T1.

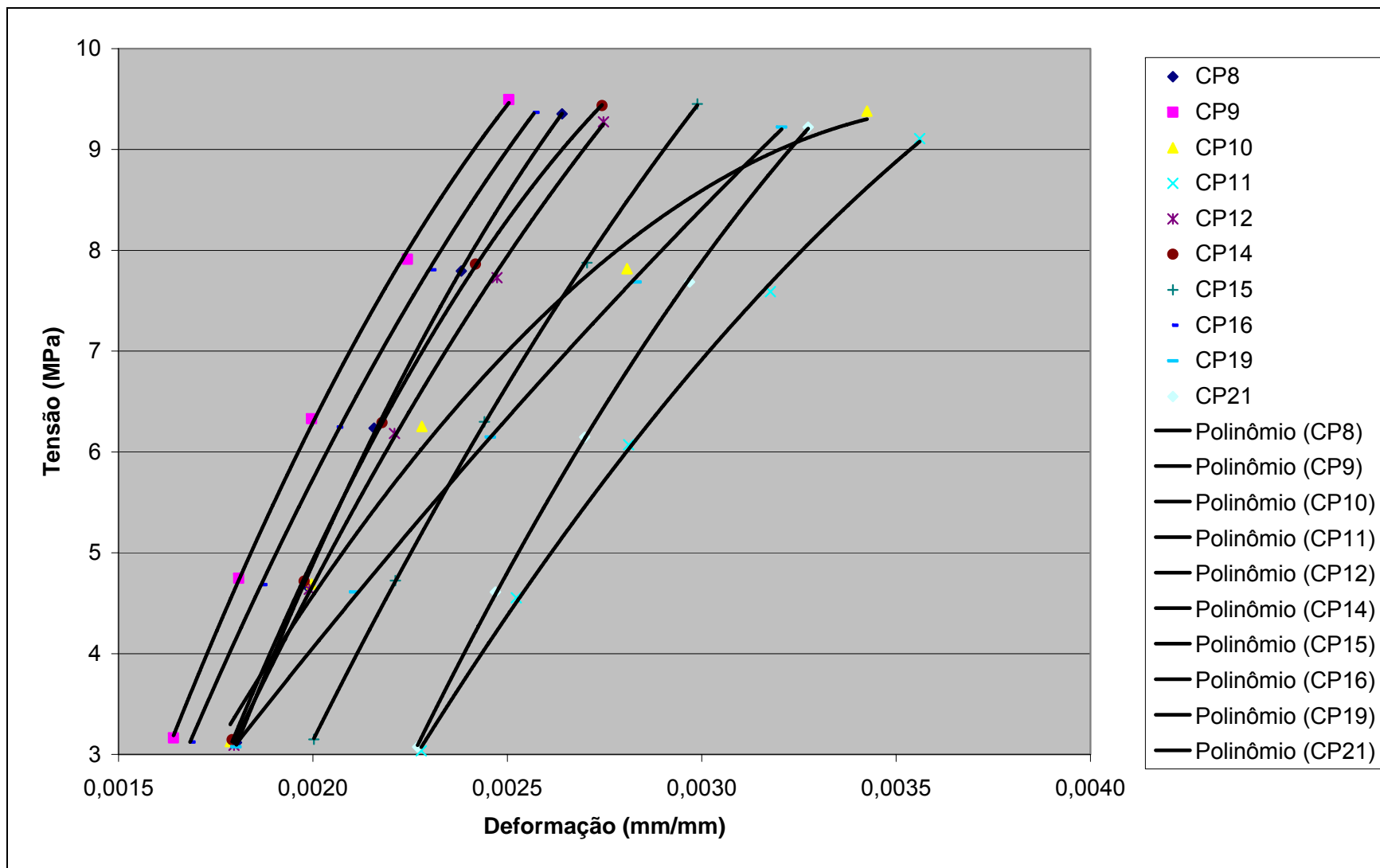


Figura D - 5 – Curvas tensão-deformação, para os relógios comparadores, para o cubo de traço T1 (a partir de 20% da carga de ruptura).

D.3.2. Traço 2

Os resultados estão apresentados da Tabela D - 27 à Tabela D - 32, e da Figura D - 6 à Figura D - 9.

Tabela D - 27 - Resultados da caracterização geométrica e pesagem dos corpos-de-prova, para o cubo de traço T2.

| CP | L1 (mm) | | | L2 (mm) | | | L3 (mm) | | | Área L1xL3 (cm²) | Volume (cm³) | Massa (g) | δ (g/cm³) |
|----|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|------------------|--------------|-----------|------------------|
| | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | | | | |
| 1 | 100,39 | 100,28 | 100,34 | 100,72 | 99,78 | 100,25 | 99,58 | 99,48 | 99,53 | 99,86 | 1001,13 | 1738,39 | 1,74 |
| 2 | 99,20 | 99,22 | 99,21 | 100,09 | 99,13 | 99,61 | 99,56 | 100,03 | 99,80 | 99,01 | 986,20 | 1719,27 | 1,74 |
| 3 | 99,73 | 100,16 | 99,95 | 100,86 | 100,59 | 100,73 | 99,68 | 100,25 | 99,97 | 99,91 | 1006,34 | 1734,46 | 1,72 |
| 4 | 99,90 | 99,54 | 99,72 | 99,50 | 99,63 | 99,57 | 98,95 | 99,02 | 98,99 | 98,71 | 982,78 | 1718,51 | 1,75 |
| 5 | 102,22 | 101,16 | 101,69 | 99,64 | 99,82 | 99,73 | 99,13 | 99,31 | 99,22 | 100,90 | 1006,24 | 1737,45 | 1,73 |
| 6 | 100,95 | 101,90 | 101,43 | 99,49 | 99,55 | 99,52 | 99,38 | 99,89 | 99,64 | 101,05 | 1005,70 | 1737,25 | 1,73 |
| 7 | 100,52 | 100,30 | 100,41 | 99,30 | 99,47 | 99,39 | 99,80 | 99,70 | 99,75 | 100,16 | 995,43 | 1721,86 | 1,73 |
| 8 | 100,10 | 99,83 | 99,97 | 99,88 | 99,95 | 99,92 | 99,47 | 99,82 | 99,65 | 99,61 | 995,25 | 1723,76 | 1,73 |
| 9 | 99,42 | 100,00 | 99,71 | 99,00 | 98,81 | 98,91 | 100,06 | 100,26 | 100,16 | 99,87 | 987,76 | 1697,98 | 1,72 |
| 10 | 99,12 | 99,55 | 99,34 | 100,19 | 100,16 | 100,18 | 99,35 | 98,98 | 99,17 | 98,51 | 986,78 | 1704,75 | 1,73 |
| 11 | 97,55 | 98,28 | 97,92 | 98,66 | 98,75 | 98,71 | 99,67 | 99,31 | 99,49 | 97,42 | 961,54 | 1672,86 | 1,74 |
| 12 | 98,38 | 98,27 | 98,33 | 98,85 | 98,79 | 98,82 | 98,05 | 98,82 | 98,44 | 96,79 | 956,44 | 1707,42 | 1,79 |
| 13 | 101,87 | 101,23 | 101,55 | 99,55 | 99,55 | 99,55 | 98,76 | 98,27 | 98,52 | 100,04 | 995,92 | 1727,19 | 1,73 |
| 14 | 102,88 | 102,98 | 102,93 | 99,58 | 99,60 | 99,59 | 99,33 | 98,78 | 99,06 | 101,96 | 1015,39 | 1767,41 | 1,74 |
| 15 | 102,41 | 102,41 | 102,41 | 100,10 | 99,63 | 99,87 | 99,61 | 100,19 | 99,90 | 102,31 | 1021,69 | 1774,14 | 1,74 |
| 16 | 101,83 | 101,94 | 101,89 | 100,02 | 99,70 | 99,86 | 99,02 | 99,16 | 99,09 | 100,96 | 1008,17 | 1754,97 | 1,74 |
| 19 | 98,55 | 98,22 | 98,39 | 99,69 | 99,08 | 99,39 | 98,46 | 98,57 | 98,52 | 96,92 | 963,28 | 1688,28 | 1,75 |
| 21 | 100,14 | 99,41 | 99,78 | 99,53 | 99,74 | 99,64 | 100,10 | 99,80 | 99,95 | 99,73 | 993,61 | 1724,47 | 1,74 |

Tabela D - 28 - Resultados do ensaio de resistência à compressão realizado na prensa EMIC, para o cubo de traço T2.

| CP | Carga de ruptura (N) | σ ruptura (MPa) |
|-------------------------|----------------------|------------------------|
| 1 | 26323 | 2,64 |
| 2 | 25127 | 2,54 |
| 3 | 21999 | 2,20 |
| 4 | 20777 | 2,10 |
| 5 | 24853 | 2,46 |
| média | | 2,39 |
| desvio-padrão | | 0,23 |
| coeficiente de variação | | 9,46% |

Tabela D - 29 - Medidas de deslocamento, fornecidas pelo extensômetro, e de carga máxima atingida para o ensaio de módulo de deformação à compressão, para o cubo de traço T2.

| CP | L0% (mm) | L10% (mm) | L20% (mm) | L30% (mm) | L40% (mm) | L50% (mm) | L60% (mm) | L70% (mm) | L80% (mm) | Fmax (kN) |
|----|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 9 | 0,00131 | 0,00364 | 0,00607 | 0,00906 | 0,01364 | 0,02083 | 0,03017 | 0,04222 | 0,05856 | 25,48 |
| 10 | 0,00056 | 0,00233 | 0,00486 | 0,00785 | 0,01242 | 0,02270 | 0,03596 | 0,06267 | 0,10526 | 20,27 |
| 11 | 0,00243 | 0,00523 | 0,00878 | 0,01289 | 0,01840 | 0,02858 | 0,04259 | 0,06211 | 0,08938 | 23,13 |
| 12 | -0,00009 | 0,00028 | 0,00140 | 0,00318 | 0,00551 | 0,00915 | 0,01457 | 0,02167 | 0,03120 | 25,58 |
| 13 | 0,00187 | 0,00495 | 0,00887 | 0,01280 | 0,01821 | 0,02643 | 0,03876 | 0,05520 | 0,07593 | 24,96 |
| 14 | 0,00187 | 0,00616 | 0,00990 | 0,01308 | 0,01793 | 0,02503 | 0,03400 | 0,04586 | 0,06267 | 24,78 |
| 15 | 0,00121 | 0,00542 | 0,00738 | 0,00943 | 0,01289 | 0,01961 | 0,02895 | 0,04082 | 0,05567 | 26,17 |
| 16 | 0,00121 | 0,00318 | 0,00644 | 0,01037 | 0,01625 | 0,02503 | 0,03615 | 0,04997 | 0,06669 | 24,53 |
| 19 | 0,00056 | 0,00187 | 0,00336 | 0,00570 | 0,00925 | 0,01485 | 0,02232 | 0,03213 | 0,04408 | 24,98 |
| 21 | -0,00009 | 0,00103 | 0,00215 | 0,00364 | 0,00560 | 0,00841 | 0,01214 | 0,01522 | 0,01924 | 25,18 |

Tabela D - 30 - Resultados de tensão e deformação para o ensaio de módulo de deformação à compressão, para o cubo de traço T2.

| CP | % da carga de ruptura | 0% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% |
|----|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Força (N) | 0 | 2100 | 4200 | 6300 | 8400 | 10500 | 12600 | 14700 | 16800 |
| 9 | σ (MPa) | 0,00 | 0,21 | 0,42 | 0,63 | 0,84 | 1,05 | 1,26 | 1,47 | 1,68 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00005 | 0,00010 | 0,00016 | 0,00025 | 0,00039 | 0,00058 | 0,00082 | 0,00115 |
| 10 | σ (MPa) | 0,00 | 0,21 | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 1,07 | 1,28 | 1,49 | 1,71 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00004 | 0,00009 | 0,00015 | 0,00024 | 0,00044 | 0,00071 | 0,00124 | 0,00209 |
| 11 | σ (MPa) | 0,00 | 0,22 | 0,43 | 0,65 | 0,86 | 1,08 | 1,29 | 1,51 | 1,72 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00006 | 0,00013 | 0,00021 | 0,00032 | 0,00052 | 0,00080 | 0,00119 | 0,00174 |
| 12 | σ (MPa) | 0,00 | 0,22 | 0,43 | 0,65 | 0,87 | 1,08 | 1,30 | 1,52 | 1,74 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00001 | 0,00003 | 0,00007 | 0,00011 | 0,00018 | 0,00029 | 0,00044 | 0,00063 |
| 13 | σ (MPa) | 0,00 | 0,21 | 0,42 | 0,63 | 0,84 | 1,05 | 1,26 | 1,47 | 1,68 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00006 | 0,00014 | 0,00022 | 0,00033 | 0,00049 | 0,00074 | 0,00107 | 0,00148 |
| 14 | σ (MPa) | 0,00 | 0,21 | 0,41 | 0,62 | 0,82 | 1,03 | 1,24 | 1,44 | 1,65 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00009 | 0,00016 | 0,00022 | 0,00032 | 0,00046 | 0,00064 | 0,00088 | 0,00122 |
| 15 | σ (MPa) | 0,00 | 0,21 | 0,41 | 0,62 | 0,82 | 1,03 | 1,23 | 1,44 | 1,64 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00008 | 0,00012 | 0,00016 | 0,00023 | 0,00037 | 0,00055 | 0,00079 | 0,00109 |
| 16 | σ (MPa) | 0,00 | 0,21 | 0,42 | 0,62 | 0,83 | 1,04 | 1,25 | 1,46 | 1,66 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00004 | 0,00010 | 0,00018 | 0,00030 | 0,00048 | 0,00070 | 0,00096 | 0,00131 |
| 19 | σ (MPa) | 0,00 | 0,22 | 0,43 | 0,65 | 0,87 | 1,08 | 1,30 | 1,52 | 1,73 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00003 | 0,00006 | 0,00010 | 0,00017 | 0,00029 | 0,00044 | 0,00063 | 0,00087 |
| 21 | σ (MPa) | 0,00 | 0,21 | 0,42 | 0,63 | 0,84 | 1,05 | 1,26 | 1,47 | 1,68 |
| | ε (mm/mm) | 0,00000 | 0,00002 | 0,00004 | 0,00007 | 0,00011 | 0,00017 | 0,00024 | 0,00031 | 0,00039 |

Tabela D - 31 - Resultados de tensão e deformação, obtidos com os relógios comparadores, para o ensaio de módulo de deformação à compressão, para o cubo de traço T2.

| CP | % da carga de rupt. | 0% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% |
|----|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 9 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,297 0,273 | 0,368 0,363 | 0,415 0,423 | 0,430 0,472 | 0,458 0,525 | 0,489 0,566 | 0,524 0,605 | 0,565 0,664 | 0,626 0,696 |
| | Lx% - LO% (mm) | - - | 0,071 0,090 | 0,118 0,150 | 0,133 0,199 | 0,161 0,252 | 0,192 0,293 | 0,227 0,332 | 0,268 0,391 | 0,329 0,423 |
| | ϵ médio (mm/mm) | 0,00000 | 0,00081 | 0,00135 | 0,00168 | 0,00209 | 0,00245 | 0,00283 | 0,00333 | 0,00380 |
| | σ (MPa) | 0,000 | 0,210 | 0,421 | 0,631 | 0,841 | 1,051 | 1,262 | 1,472 | 1,682 |
| 10 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,259 0,164 | 0,328 0,232 | 0,369 0,279 | 0,376 0,318 | 0,406 0,348 | 0,459 0,371 | 0,600 0,380 | 0,680 0,404 | 0,974 0,392 |
| | Lx% - LO% (mm) | - - | 0,069 0,068 | 0,110 0,115 | 0,117 0,154 | 0,147 0,184 | 0,200 0,207 | 0,341 0,216 | 0,421 0,240 | 0,715 0,228 |
| | ϵ médio (mm/mm) | 0,00000 | 0,00068 | 0,00112 | 0,00135 | 0,00165 | 0,00203 | 0,00278 | 0,00330 | 0,00471 |
| | σ (MPa) | 0,000 | 0,213 | 0,426 | 0,640 | 0,853 | 1,066 | 1,279 | 1,492 | 1,705 |
| 11 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,296 0,481 | 0,374 0,568 | 0,422 0,633 | 0,436 0,690 | 0,468 0,810 | 0,500 0,915 | 0,572 0,995 | 0,635 1,076 | 0,763 1,189 |
| | Lx% - LO% (mm) | - - | 0,078 0,087 | 0,126 0,152 | 0,140 0,209 | 0,172 0,329 | 0,204 0,434 | 0,276 0,514 | 0,339 0,595 | 0,467 0,708 |
| | ϵ médio (mm/mm) | 0,00000 | 0,00084 | 0,00141 | 0,00177 | 0,00254 | 0,00323 | 0,00400 | 0,00473 | 0,00595 |
| | σ (MPa) | 0,000 | 0,216 | 0,431 | 0,647 | 0,862 | 1,078 | 1,293 | 1,509 | 1,725 |
| 12 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,281 0,229 | 0,351 0,294 | 0,389 0,346 | 0,391 0,395 | 0,406 0,427 | 0,436 0,461 | 0,462 0,492 | 0,496 0,523 | 0,549 0,564 |
| | Lx% - LO% (mm) | - - | 0,070 0,065 | 0,108 0,117 | 0,110 0,166 | 0,125 0,198 | 0,155 0,232 | 0,181 0,263 | 0,215 0,294 | 0,268 0,335 |
| | ϵ médio (mm/mm) | 0,00000 | 0,00068 | 0,00114 | 0,00140 | 0,00163 | 0,00196 | 0,00225 | 0,00258 | 0,00305 |
| | σ (MPa) | 0,000 | 0,217 | 0,434 | 0,651 | 0,868 | 1,085 | 1,302 | 1,519 | 1,736 |
| 13 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,485 0,275 | 0,545 0,339 | 0,582 0,388 | 0,599 0,418 | 0,646 0,449 | 0,690 0,484 | 0,745 0,527 | 0,799 0,564 | 0,874 0,625 |
| | Lx% - LO% (mm) | - - | 0,060 0,064 | 0,097 0,113 | 0,114 0,143 | 0,161 0,174 | 0,205 0,209 | 0,260 0,252 | 0,314 0,289 | 0,389 0,350 |
| | ϵ médio (mm/mm) | 0,00000 | 0,00062 | 0,00105 | 0,00129 | 0,00168 | 0,00208 | 0,00257 | 0,00303 | 0,00371 |
| | σ (MPa) | 0,000 | 0,210 | 0,420 | 0,630 | 0,840 | 1,050 | 1,259 | 1,469 | 1,679 |
| 14 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,259 0,132 | 0,356 0,222 | 0,420 0,281 | 0,456 0,320 | 0,501 0,348 | 0,540 0,377 | 0,592 0,408 | 0,643 0,439 | 0,720 0,487 |
| | Lx% - LO% (mm) | - - | 0,097 0,090 | 0,161 0,149 | 0,197 0,188 | 0,242 0,216 | 0,281 0,245 | 0,333 0,276 | 0,384 0,307 | 0,461 0,355 |
| | ϵ médio (mm/mm) | 0,00000 | 0,00094 | 0,00156 | 0,00193 | 0,00230 | 0,00264 | 0,00306 | 0,00347 | 0,00410 |
| | σ (MPa) | 0,000 | 0,206 | 0,412 | 0,618 | 0,824 | 1,030 | 1,236 | 1,442 | 1,648 |
| 15 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,069 0,190 | 0,140 0,291 | 0,176 0,343 | 0,190 0,394 | 0,226 0,430 | 0,258 0,460 | 0,288 0,494 | 0,323 0,524 | 0,373 0,564 |
| | Lx% - LO% (mm) | - - | 0,071 0,101 | 0,107 0,153 | 0,121 0,204 | 0,157 0,240 | 0,189 0,270 | 0,219 0,304 | 0,254 0,334 | 0,304 0,374 |
| | ϵ médio (mm/mm) | 0,00000 | 0,00086 | 0,00130 | 0,00163 | 0,00199 | 0,00230 | 0,00262 | 0,00294 | 0,00339 |
| | σ (MPa) | 0,000 | 0,205 | 0,411 | 0,616 | 0,821 | 1,026 | 1,232 | 1,437 | 1,642 |
| 16 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,147 0,119 | 0,194 0,165 | 0,231 0,206 | 0,253 0,237 | 0,284 0,264 | 0,319 0,300 | 0,355 0,337 | 0,398 0,374 | 0,460 0,425 |
| | Lx% - LO% (mm) | - - | 0,047 0,046 | 0,084 0,087 | 0,106 0,118 | 0,137 0,145 | 0,172 0,181 | 0,208 0,218 | 0,251 0,255 | 0,313 0,306 |
| | ϵ médio (mm/mm) | 0,00000 | 0,00047 | 0,00086 | 0,00112 | 0,00141 | 0,00177 | 0,00213 | 0,00253 | 0,00310 |
| | σ (MPa) | 0,000 | 0,208 | 0,416 | 0,624 | 0,832 | 1,040 | 1,248 | 1,456 | 1,664 |
| 19 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,117 0,165 | 0,179 0,217 | 0,222 0,259 | 0,254 0,277 | 0,286 0,298 | 0,327 0,327 | 0,366 0,358 | 0,417 0,390 | 0,477 0,431 |
| | Lx% - LO% (mm) | - - | 0,062 0,052 | 0,105 0,094 | 0,137 0,112 | 0,169 0,133 | 0,210 0,162 | 0,249 0,193 | 0,300 0,225 | 0,360 0,266 |
| | ϵ médio (mm/mm) | 0,00000 | 0,00057 | 0,00100 | 0,00125 | 0,00152 | 0,00187 | 0,00222 | 0,00264 | 0,00315 |
| | σ (MPa) | 0,000 | 0,217 | 0,433 | 0,650 | 0,867 | 1,083 | 1,300 | 1,517 | 1,733 |
| 21 | Leitura (mm) (r1/r2) | 0,372 0,185 | 0,437 0,239 | 0,487 0,280 | 0,507 0,306 | 0,549 0,331 | 0,598 0,364 | 0,653 0,396 | 0,723 0,433 | 0,802 0,479 |
| | Lx% - LO% (mm) | - - | 0,065 0,054 | 0,115 0,095 | 0,135 0,121 | 0,177 0,146 | 0,226 0,179 | 0,281 0,211 | 0,351 0,248 | 0,430 0,294 |
| | ϵ médio (mm/mm) | 0,00000 | 0,00060 | 0,00105 | 0,00128 | 0,00162 | 0,00203 | 0,00247 | 0,00301 | 0,00363 |
| | σ (MPa) | 0 | 0,211 | 0,421 | 0,632 | 0,842 | 1,053 | 1,263 | 1,474 | 1,685 |

Tabela D - 32 - Valores de módulo de deformação à compressão para o cubo de traço T2.

| CP | Extensômetro | | | | | | Rel. comparadores | | | |
|----|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|---------------|-------------------|------------------------|---------------|--------|
| | ϵ 10% (mm/mm) | ϵ 50% (mm/mm) | σ 10% (MPa) | σ 50% (MPa) | E inicial (GPa) | E tg50% (GPa) | E 10%/50% (GPa) | ϵ 50% (mm/mm) | E tg50% (GPa) | |
| 9 | 0,000047 | 0,000390 | 0,21 | 1,05 | 5,12 | 1,19 | 2,45 | 0,002452 | 0,53 | |
| 10 | 0,000035 | 0,000443 | 0,21 | 1,07 | 5,65 | 0,85 | 2,09 | 0,002031 | 0,50 | |
| 11 | 0,000056 | 0,000523 | 0,22 | 1,08 | 3,84 | 0,86 | 1,85 | 0,003232 | - | |
| 12 | 0,000007 | 0,000185 | 0,22 | 1,08 | - | - | - | 0,001958 | 0,72 | |
| 13 | 0,000062 | 0,000491 | 0,21 | 1,05 | 3,41 | 0,97 | 1,95 | 0,002079 | 0,51 | |
| 14 | 0,000086 | 0,000463 | 0,21 | 1,03 | 2,76 | 1,21 | 2,18 | 0,002641 | 0,52 | |
| 15 | 0,000084 | 0,000368 | 0,21 | 1,03 | 3,68 | 1,50 | 2,89 | 0,002298 | 0,60 | |
| 16 | 0,000039 | 0,000476 | 0,21 | 1,04 | 4,43 | 0,89 | 1,90 | 0,001767 | 0,60 | |
| 19 | 0,000026 | 0,000286 | 0,22 | 1,08 | - | - | - | 0,001872 | 0,65 | |
| 21 | 0,000022 | 0,000170 | 0,21 | 1,05 | - | - | - | 0,002032 | 0,53 | |
| | | | | | média | 4,13 | 1,07 | 2,19 | 0,00 | 0,57 |
| | | | | | desvio-padrão | 1,01 | 0,24 | 0,37 | 0,00 | 0,07 |
| | | | | | coeficiente de variação | 24,38% | 22,64% | 16,94% | 19,68% | 13,04% |

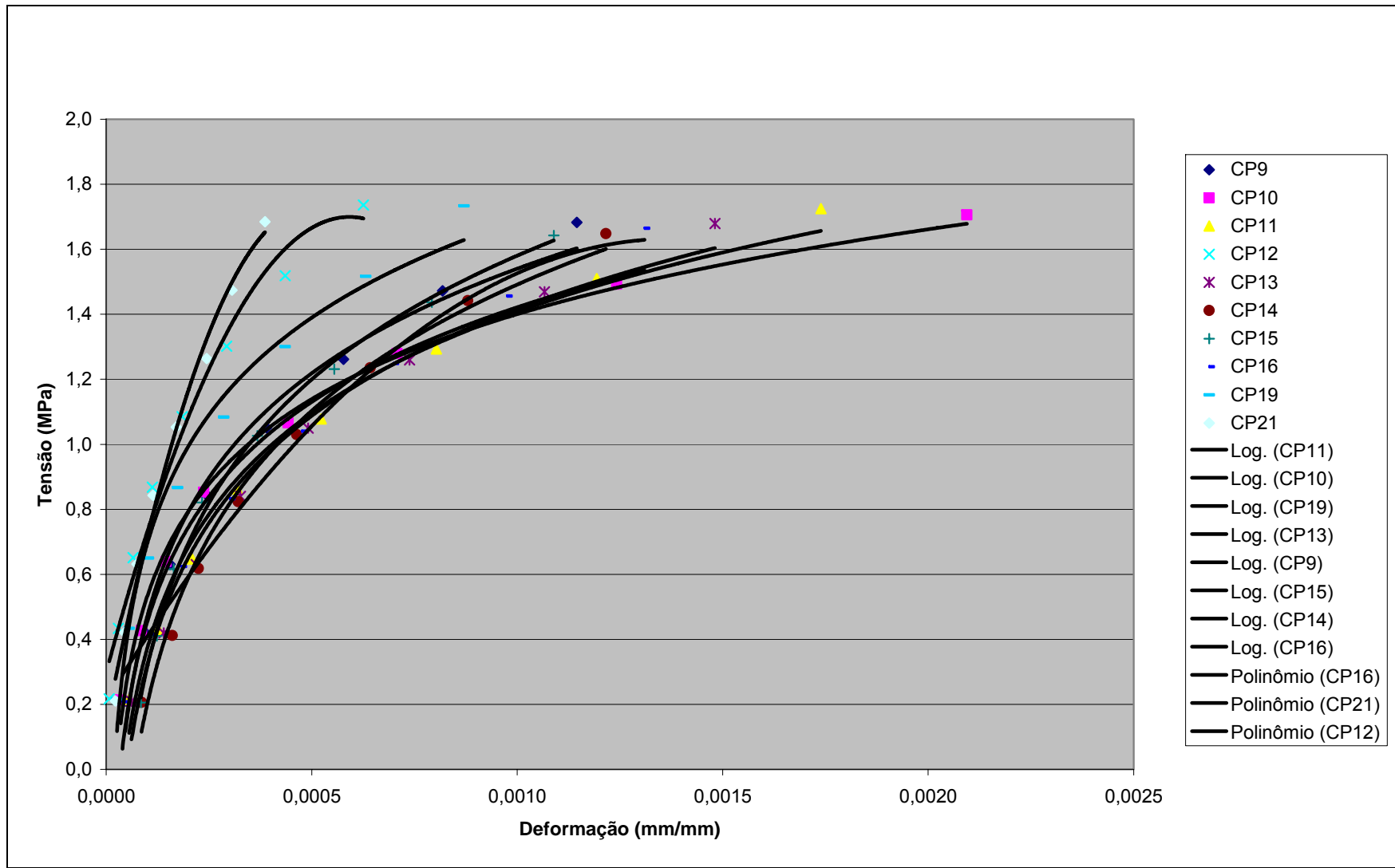


Figura D - 6 - Curvas tensão-deformação, pelo extensômetro, para o cubo de traço T2.

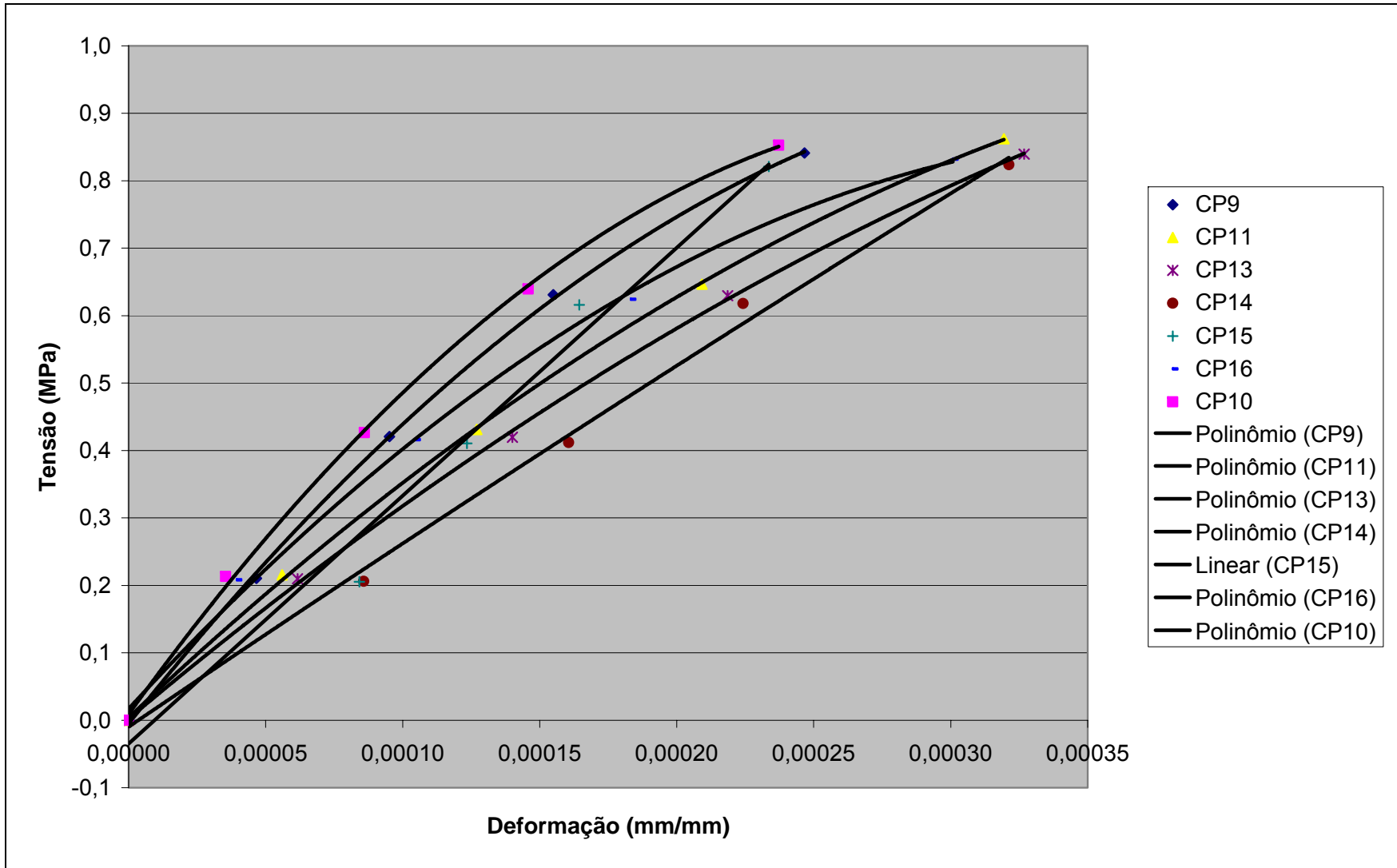


Figura D - 7 - Trecho inicial (até 40% da carga de ruptura) das curvas tensão-deformação, pelo extensômetro, para o cubo de traço T2.

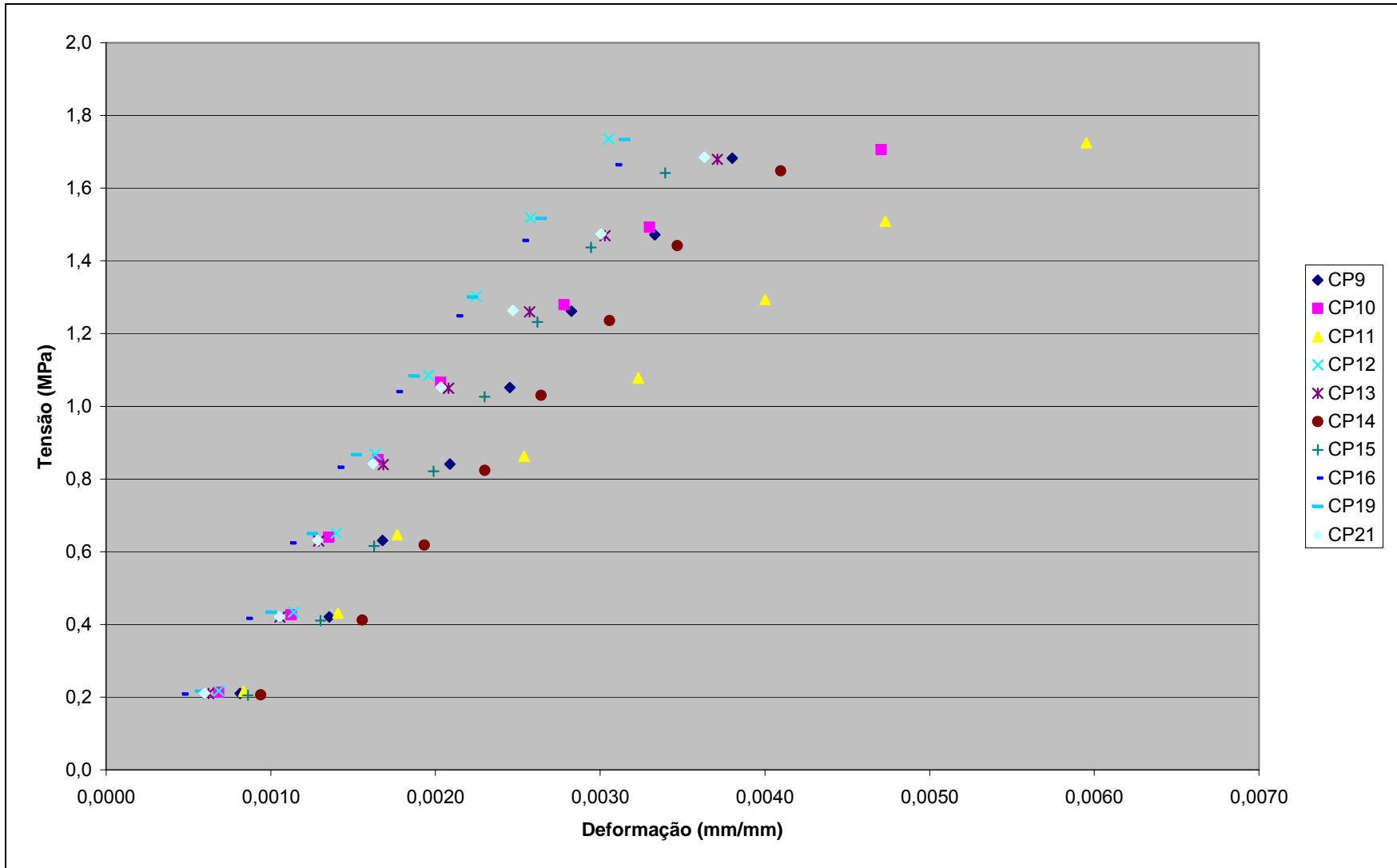


Figura D - 8 - Pares tensão-deformação, pelos relógios comparadores, para o cubo do traço T2.

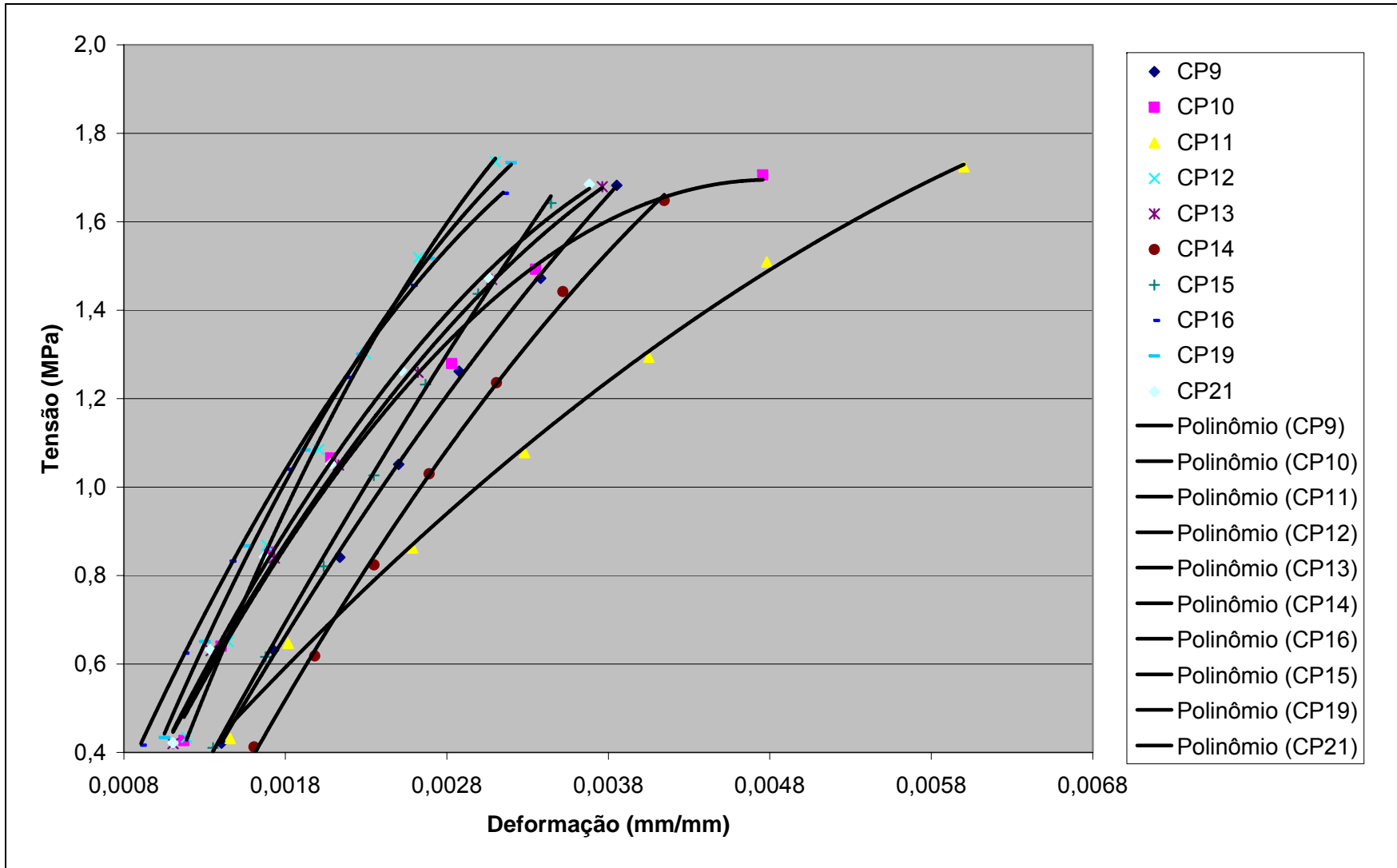


Figura D - 9 - Curvas tensão-deformação, para os relógios comparadores, para o cubo de traço T2 (a partir de 20% da carga de ruptura).

D.4. Placa

D.4.1. Traço 1

Os resultados estão apresentados da Tabela D - 33 à Tabela D - 39, e também da Figura D - 10 à Figura D - 14.

Tabela D - 33 - Resultados da caracterização geométrica e pesagem dos corpos-de-prova, para a placa de traço T1.

| CP | L1 (mm) | | | L2 (mm) | | | L3 (mm) | | | Volume (cm ³) | Massa (g) | δ (g/cm ³) |
|----|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|--------|--------|---------------------------|-----------|-------------------------------|
| | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | | | |
| 1 | 25,94 | 26,92 | 26,43 | 75,56 | 75,50 | 75,53 | 199,75 | 199,65 | 199,70 | 398,65 | 744,30 | 1,87 |
| 2 | 25,74 | 26,58 | 26,16 | 75,07 | 75,03 | 75,05 | 200,20 | 200,10 | 200,15 | 392,96 | 735,49 | 1,87 |
| 3 | 25,84 | 26,72 | 26,28 | 74,78 | 75,43 | 75,11 | 199,30 | 199,35 | 199,33 | 393,42 | 736,61 | 1,87 |
| 4 | 25,42 | 26,43 | 25,93 | 75,21 | 75,46 | 75,34 | 199,50 | 199,40 | 199,45 | 389,54 | 731,53 | 1,88 |
| 5 | 26,83 | 27,60 | 27,22 | 75,23 | 75,43 | 75,33 | 199,65 | 199,65 | 199,65 | 409,30 | 761,14 | 1,86 |
| 6 | 27,06 | 27,98 | 27,52 | 75,72 | 75,85 | 75,79 | 199,50 | 199,85 | 199,68 | 416,44 | 765,79 | 1,84 |
| 7 | 28,00 | 27,03 | 27,52 | 75,27 | 75,41 | 75,34 | 199,55 | 199,60 | 199,58 | 413,72 | 763,49 | 1,85 |
| 8 | 26,75 | 26,38 | 26,57 | 75,19 | 75,57 | 75,38 | 200,10 | 200,15 | 200,13 | 400,74 | 739,14 | 1,84 |

Tabela D - 34 - Resultados das medidas de espessura modificadas, após lixar os corpos-de-prova, para a placa de traço T1.

| CP | L1 (mm) | | | |
|----|---------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | média |
| 4 | 26,19 | 26,12 | 25,47 | 25,93 |
| 7 | 26,77 | 27,52 | 26,40 | 26,90 |
| 8 | 26,22 | 26,75 | 26,01 | 26,33 |

Tabela D - 35 - Resultados do ensaio de módulo de deformação pelo ultrassom, obtidos para diferentes direções de medição, para a placa de traço T1.

| CP | Longitudinal (D1) | | | Espessura (D2) | | | |
|-------------------------|-------------------|-------------------|---------|-------------------|-------------------|---------|-------|
| | Tempo (μ s) | Velocidade (km/s) | E (GPa) | Tempo (μ s) | Velocidade (km/s) | E (GPa) | |
| 1 | 75,6 | 2,64 | 11,72 | 10,2 | 2,59 | 11,28 | |
| 2 | 76,3 | 2,62 | 11,59 | 10,6 | 2,47 | 10,26 | |
| 3 | 77,7 | 2,57 | 11,09 | 10,4 | 2,53 | 10,76 | |
| 4 | 77,2 | 2,58 | 11,28 | 10,3 | 2,52 | 10,71 | |
| 5 | 76,3 | 2,62 | 11,46 | 10,6 | 2,57 | 11,03 | |
| 6 | 76,3 | 2,62 | 11,33 | 10,7 | 2,57 | 10,95 | |
| 7 | 77,3 | 2,58 | 11,07 | 11,1 | 2,48 | 10,21 | |
| 8 | 77,2 | 2,59 | 11,16 | 10,4 | 2,55 | 10,83 | |
| média | | | 11,34 | média | | | 10,75 |
| desvio-padrão | | | 0,24 | desvio-padrão | | | 0,37 |
| coeficiente de variação | | | 2,10% | coef. de variação | | | 3,42% |

Tabela D - 36 - Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão realizado na prensa INSTRON, para a placa de traço T1.

| CP | Carga de ruptura (N) | σ ruptura (MPa) |
|----------|----------------------|------------------------|
| 1 | 463,86 | 2,11 |
| 2 | 456,04 | 2,13 |
| 3 | 453,51 | 2,10 |
| média | 457,80 | 2,11 |
| desv pad | 5,39 | 0,02 |
| coef var | 1,18% | 0,78% |

Tabela D - 37 - Valores de módulo de deformação, carga e tensão de ruptura fornecidos pela INSTRON, no ensaio de módulo de deformação à tração na flexão, para a placa de traço T1.

| CP | E dado pela INSTRON (MPa) | Carga de ruptura (N) | σ ruptura (MPa) |
|----------|---------------------------|----------------------|------------------------|
| 4 | 3692,54 | 353,19 | 1,67 |
| 5 | 4843,07 | 499,65 | 2,15 |
| 6 | 5423,69 | 480,93 | 2,01 |
| 7 | 2084,59 | 502,23 | 2,21 |
| 8 | 3065,55 | 463,40 | 2,13 |
| média | 3821,89 | 459,88 | 2,03 |
| desv pad | 1343,09 | 61,67 | 0,21 |
| coef var | 35,14% | 13,41% | 10,54% |

Tabela D - 38 - Medidas e resultados do ensaio de módulo de deformação 5%/30% à tração na flexão, para a placa de traço T1.

| CP | 5% σ ruptura (MPa) | 30% σ ruptura (MPa) | δ 5% (mm) | δ 30% (mm) | b (mm) | h (mm) | E 5% (MPa) | E 30% (MPa) | ϵ 5% (mm/mm) | ϵ 30% (mm/mm) | E 5%/30% (GPa) |
|-------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------|-------------------|--------|--------|------------|-------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| 4 | 0,08 | 0,50 | -0,0019 | 0,0324 | 75,34 | 25,93 | -7303,56 | 2547,18 | -0,000011 | 0,000197 | 2,01 |
| 5 | 0,11 | 0,64 | 0,0066 | 0,0305 | 75,33 | 27,22 | 2535,82 | 3309,41 | 0,000042 | 0,000195 | 3,52 |
| 6 | 0,10 | 0,60 | 0,0042 | 0,0243 | 75,79 | 27,52 | 3693,83 | 3844,47 | 0,000027 | 0,000157 | 3,88 |
| 7 | 0,11 | 0,66 | 0,0062 | 0,0509 | 75,34 | 26,90 | 2838,62 | 2068,46 | 0,000039 | 0,000321 | 1,96 |
| 8 | 0,11 | 0,64 | 0,0069 | 0,0420 | 75,38 | 26,33 | 2930,00 | 2463,11 | 0,000036 | 0,000259 | 2,39 |
| média | | | | | | | | | | | 2,75 |
| desvio-padrão | | | | | | | | | | | 0,89 |
| coeficiente de variação | | | | | | | | | | | 32,38% |

Tabela D - 39 - Medidas e resultados do ensaio de módulo de deformação 10%/50% à tração na flexão, para a placa de traço T1.

| CP | 10% σ ruptura (MPa) | 50% σ ruptura (MPa) | δ 10% (mm) | δ 50% (mm) | b (mm) | h (mm) | E 10% (MPa) | E 50% (MPa) | ϵ 10% (mm/mm) | ϵ 50% (mm/mm) | E 10%/50% (GPa) |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|--------|--------|-------------|-------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| 4 | 0,17 | 0,84 | 0,0177 | 0,0490 | 75,34 | 25,93 | 1556,73 | 2812,21 | 0,000108 | 0,000298 | 3,52 |
| 5 | 0,21 | 1,07 | 0,0124 | 0,0464 | 75,33 | 27,22 | 2727,59 | 3634,36 | 0,000079 | 0,000296 | 3,96 |
| 6 | 0,20 | 1,01 | 0,0093 | 0,0363 | 75,79 | 27,52 | 3341,14 | 4291,31 | 0,000060 | 0,000234 | 4,62 |
| 7 | 0,22 | 1,11 | 0,0164 | 0,0819 | 75,34 | 26,90 | 2139,98 | 2142,44 | 0,000103 | 0,000516 | 2,14 |
| 8 | 0,21 | 1,06 | 0,0132 | 0,0687 | 75,38 | 26,33 | 2606,60 | 2509,31 | 0,000082 | 0,000424 | 2,49 |
| média | | | | | | | | | | | 3,35 |
| desvio-padrão | | | | | | | | | | | 1,03 |
| coeficiente de variação | | | | | | | | | | | 30,69% |

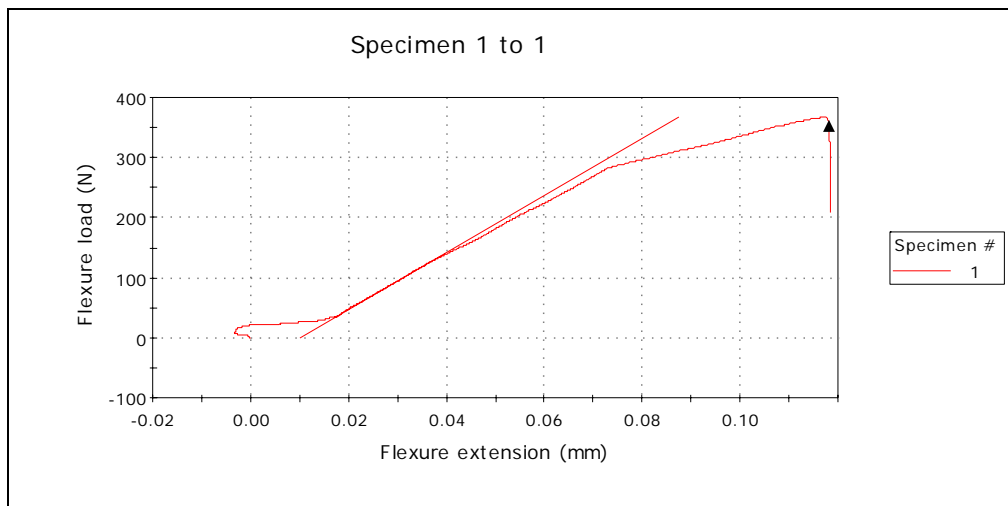


Figura D - 10 - Curva carregamento vs. flecha para o corpo-de-prova 4 da placa de traço T1. A reta observada no gráfico é traçada pelo programa, para que a INSTRON calcule o módulo de deformação.

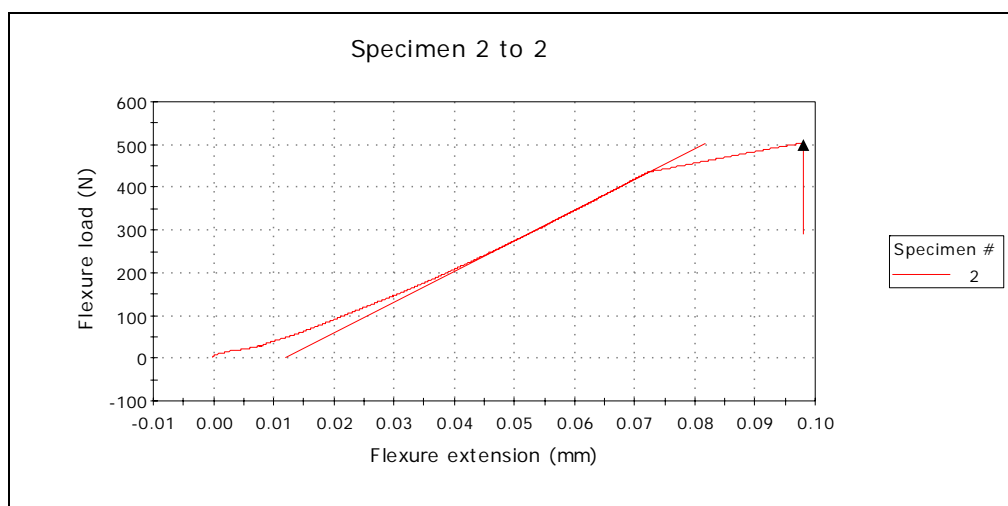


Figura D - 11 - Curva carregamento vs. flecha para o corpo-de-prova 5 da placa de traço T1.

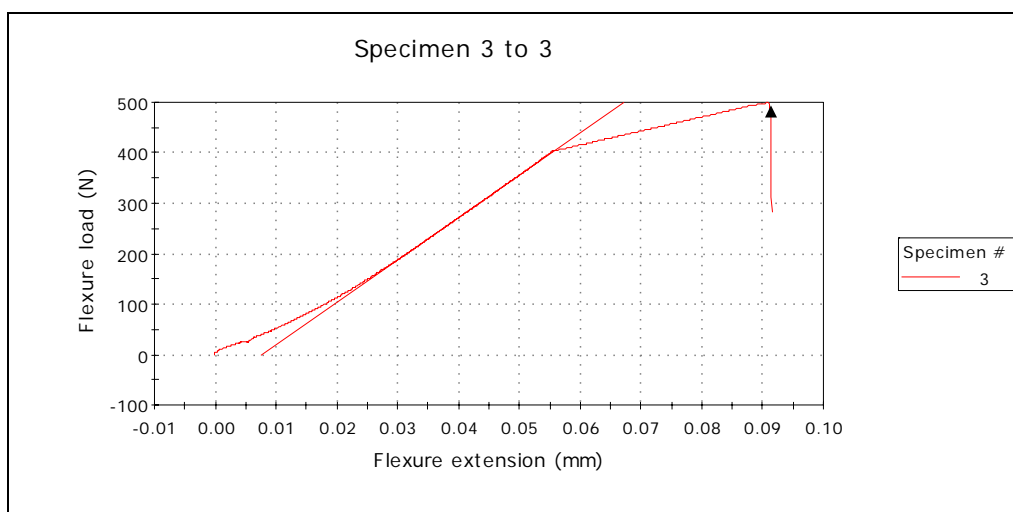


Figura D - 12 - Curva carregamento vs. flecha para o corpo-de-prova 6 da placa de traço T1.

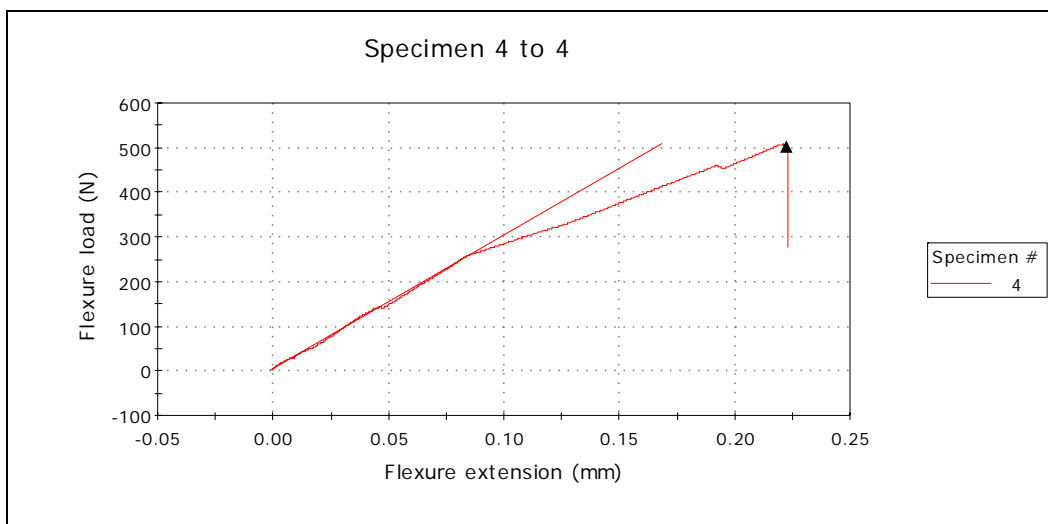


Figura D - 13 - Curva carregamento vs. flecha para o corpo-de-prova 7 da placa de traço T1.

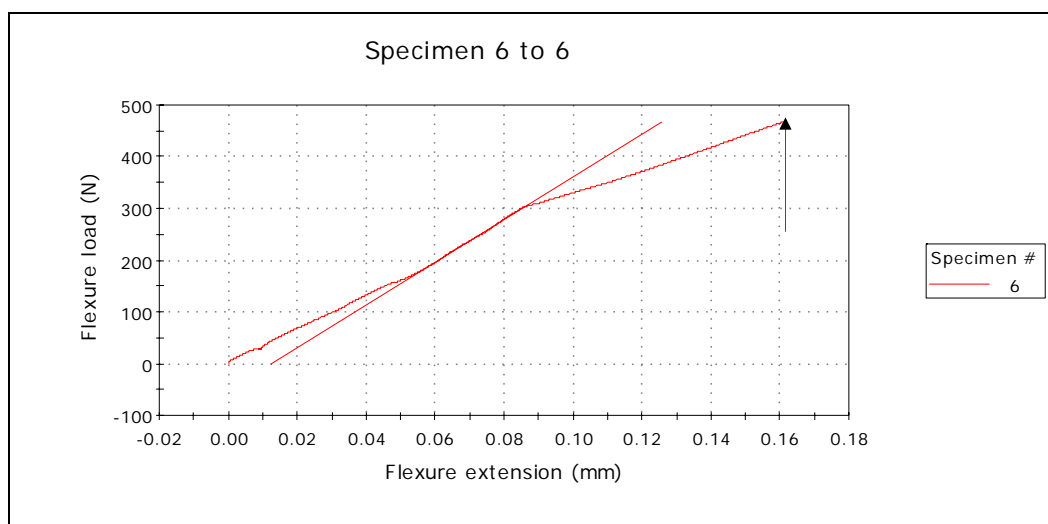


Figura D - 14 - Curva carregamento vs. flecha para o corpo-de-prova 8 da placa de traço T1.

D.4.2. Traço 2

Os resultados apresentam-se da Tabela D - 40 à Tabela D - 46, e da Figura D - 15 à Figura D - 19.

Tabela D - 40 - Resultados da caracterização geométrica e pesagem dos corpos-de-prova, para a placa de traço T2.

| CP | L1 (mm) | | | L2 (mm) | | | L3 (mm) | | | Volume (cm ³) | Massa (g) | δ (g/cm ³) |
|----|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|--------|--------|---------------------------|-----------|-------------------------------|
| | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | | | |
| 1 | 26,23 | 26,77 | 26,50 | 74,64 | 74,80 | 74,72 | 199,60 | 199,60 | 199,60 | 395,22 | 703,43 | 1,78 |
| 2 | 25,99 | 26,61 | 26,30 | 74,64 | 74,59 | 74,62 | 200,00 | 199,95 | 199,98 | 392,43 | 702,16 | 1,79 |
| 3 | 25,92 | 26,00 | 25,96 | 74,59 | 74,62 | 74,61 | 199,45 | 199,35 | 199,40 | 386,19 | 684,60 | 1,77 |
| 4 | 25,93 | 26,91 | 26,42 | 74,60 | 74,88 | 74,74 | 199,50 | 199,75 | 199,63 | 394,19 | 693,85 | 1,76 |
| 5 | 26,68 | 25,67 | 26,18 | 74,88 | 74,74 | 74,81 | 198,90 | 199,00 | 198,95 | 389,57 | 695,31 | 1,78 |
| 6 | 26,94 | 25,92 | 26,43 | 75,10 | 75,01 | 75,06 | 198,50 | 198,65 | 198,58 | 393,91 | 704,02 | 1,79 |
| 7 | 25,88 | 26,86 | 26,37 | 75,10 | 75,15 | 75,13 | 199,05 | 199,00 | 199,03 | 394,28 | 699,53 | 1,77 |
| 8 | 26,36 | 26,23 | 26,30 | 75,11 | 75,25 | 75,18 | 199,00 | 198,75 | 198,88 | 393,15 | 697,35 | 1,77 |

Tabela D - 41 - Resultados das medidas de espessura modificadas, após lixar os corpos-de-prova, para a placa de traço T2.

| CP | L1 (mm) | | | |
|----|---------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | média |
| 4 | 25,36 | 26,35 | 24,32 | 25,34 |
| 6 | 26,56 | 26,51 | 26,06 | 26,38 |
| 7 | 25,84 | 26,08 | 26,70 | 26,21 |
| 8 | 26,34 | 26,18 | 25,86 | 26,13 |

Tabela D - 42 - Resultados do ensaio de módulo de deformação pelo ultrassom, obtidos para diferentes direções de medição, para a placa de traço T2.

| CP | Longitudinal (D1) | | | Espessura (D2) | | | |
|-------------------------|-------------------|-------------------|---------|-------------------|-------------------|---------|-------|
| | Tempo (µs) | Velocidade (km/s) | E (GPa) | Tempo (µs) | Velocidade (km/s) | E (GPa) | |
| 1 | 110,0 | 1,814545455 | 5,27 | 15,7 | 1,687898089 | 4,56 | |
| 2 | 115,6 | 1,729887543 | 4,82 | 15,7 | 1,675159236 | 4,52 | |
| 3 | 116,6 | 1,710120069 | 4,67 | 15,8 | 1,643037975 | 4,31 | |
| 4 | 108,7 | 1,836476541 | 5,34 | 15,1 | 1,749668874 | 4,85 | |
| 5 | 113,4 | 1,754409171 | 4,94 | 14,8 | 1,768581081 | 5,02 | |
| 6 | 115,2 | 1,723741319 | 4,78 | 15,3 | 1,72745098 | 4,80 | |
| 7 | 115,6 | 1,72166955 | 4,73 | 15,4 | 1,712337662 | 4,68 | |
| 8 | 119,8 | 1,660058431 | 4,40 | 15,2 | 1,729934211 | 4,78 | |
| média | | | 4,87 | média | | | 4,69 |
| desvio-padrão | | | 0,31 | desvio-padrão | | | 0,22 |
| coeficiente de variação | | | 6,43% | coef. de variação | | | 4,76% |

Tabela D - 43 - Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão realizado na prensa INSTRON, para a placa de traço T2.

| CP | Carga de ruptura (N) | σ ruptura (MPa) |
|----------|----------------------|------------------------|
| 1 | 190,31 | 0,87 |
| 2 | 162,28 | 0,75 |
| 3 | 152,24 | 0,73 |
| média | 168,28 | 0,78 |
| desv pad | 19,73 | 0,08 |
| coef var | 11,73% | 9,72% |

Tabela D - 44 - Valores de módulo de deformação, carga e tensão de ruptura fornecidos pela INSTRON, no ensaio de módulo de deformação à tração na flexão, para a placa de traço T2.

| CP | E dado pela INSTRON (MPa) | Carga de ruptura (N) | σ ruptura (MPa) |
|----------|---------------------------|----------------------|------------------------|
| 4 | 974,71 | 165,87 | 0,83 |
| 5 | 1753,28 | 174,75 | 0,82 |
| 6 | 1791,02 | 195,30 | 0,90 |
| 7 | 1740,01 | 202,78 | 0,94 |
| 8 | 1365,78 | 184,06 | 0,86 |
| média | 1524,96 | 184,55 | 0,87 |
| desv pad | 352,59 | 14,94 | 0,05 |
| coef var | 23,12% | 8,10% | 5,89% |

Tabela D - 45 - Medidas e resultados do ensaio de módulo de deformação 5%/30% à tração na flexão, para a placa de traço T2.

| CP | 5% σ ruptura (MPa) | 30% σ ruptura (MPa) | δ 5% (mm) | δ 30% (mm) | b (mm) | h (mm) | E 5% (MPa) | E 30% (MPa) | ϵ 5% (mm/mm) | ϵ 30% (mm/mm) | E 5%/30% (GPa) |
|-------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------|-------------------|--------|--------|------------|-------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| 4 | 0,041 | 0,249 | 0,0138 | 0,0557 | 74,74 | 25,34 | 504,28 | 751,50 | 0,000082 | 0,000331 | 0,83* |
| 5 | 0,041 | 0,245 | 0,0032 | 0,0281 | 74,81 | 26,18 | 2052,92 | 1424,53 | 0,000020 | 0,000172 | 1,34 |
| 6 | 0,045 | 0,269 | 0,0031 | 0,0269 | 75,06 | 26,38 | 2357,79 | 1616,70 | 0,000019 | 0,000167 | 1,52 |
| 7 | 0,047 | 0,283 | 0,0032 | 0,0285 | 75,13 | 26,21 | 2411,63 | 1614,40 | 0,000020 | 0,000175 | 1,51 |
| 8 | 0,043 | 0,258 | 0,0033 | 0,0320 | 75,18 | 26,13 | 2138,33 | 1317,96 | 0,000020 | 0,000196 | 1,22 |
| média | | | | | | | | | | | 1,40 |
| desvio-padrão | | | | | | | | | | | 0,14 |
| coeficiente de variação | | | | | | | | | | | 10,27% |

** Este valor foi excluído dos cálculos de média, desvio-padrão e coef. de variação, pois é muito discrepante*

Tabela D - 46 - Medidas e resultados do ensaio de módulo de deformação 10%/50% à tração na flexão, para a placa de traço T2.

| CP | 10% σ ruptura (MPa) | 50% σ ruptura (MPa) | δ 10% (mm) | δ 50% (mm) | b (mm) | h (mm) | E 10% (MPa) | E 50% (MPa) | ϵ 10% (mm/mm) | ϵ 50% (mm/mm) | E 10%/50% (GPa) |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|--------|--------|-------------|-------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| 4 | 0,083 | 0,415 | 0,0251 | 0,0854 | 74,74 | 25,34 | 556,78 | 816,99 | 0,000149 | 0,000508 | 0,93* |
| 5 | 0,082 | 0,409 | 0,0091 | 0,0449 | 74,81 | 26,18 | 1465,52 | 1485,79 | 0,000056 | 0,000275 | 1,49 |
| 6 | 0,090 | 0,449 | 0,0074 | 0,0444 | 75,06 | 26,38 | 1950,97 | 1633,77 | 0,000046 | 0,000275 | 1,57 |
| 7 | 0,094 | 0,472 | 0,0093 | 0,0501 | 75,13 | 26,21 | 1644,07 | 1532,99 | 0,000057 | 0,000308 | 1,51 |
| 8 | 0,086 | 0,430 | 0,0095 | 0,0652 | 75,18 | 26,13 | 1476,13 | 1078,57 | 0,000058 | 0,000399 | 1,01 |
| média | | | | | | | | | | | 1,39 |
| desvio-padrão | | | | | | | | | | | 0,26 |
| coeficiente de variação | | | | | | | | | | | 18,53% |

** Este valor foi excluído dos cálculos de média, desvio-padrão e coef. de variação, pois é muito discrepante*

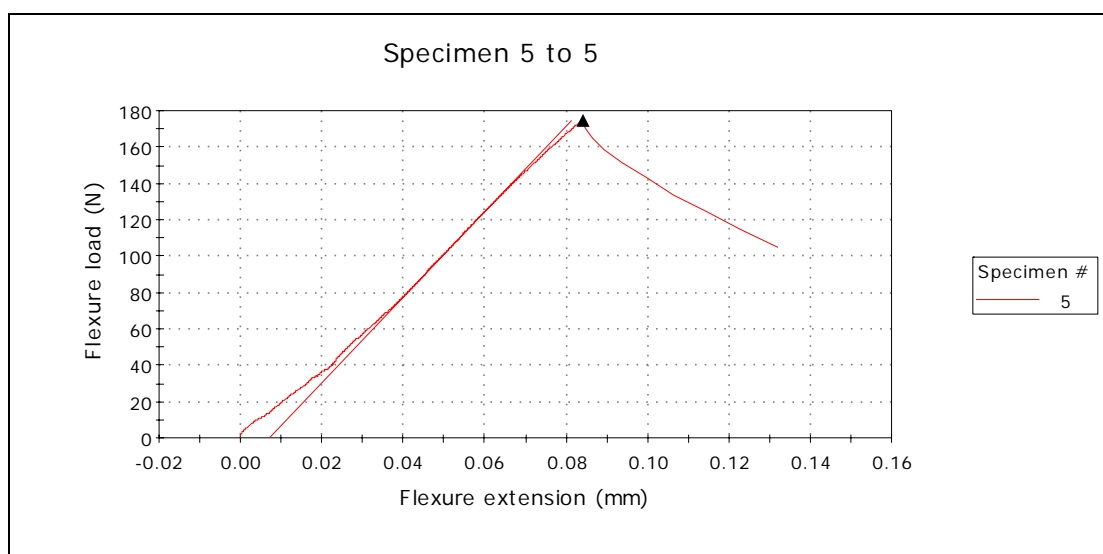


Figura D - 15 - Curva carregamento vs. flecha para o corpo-de-prova 4 da placa de traço T2. A reta observada no gráfico é traçada pelo programa, para que a INSTRON calcule o módulo de deformação.

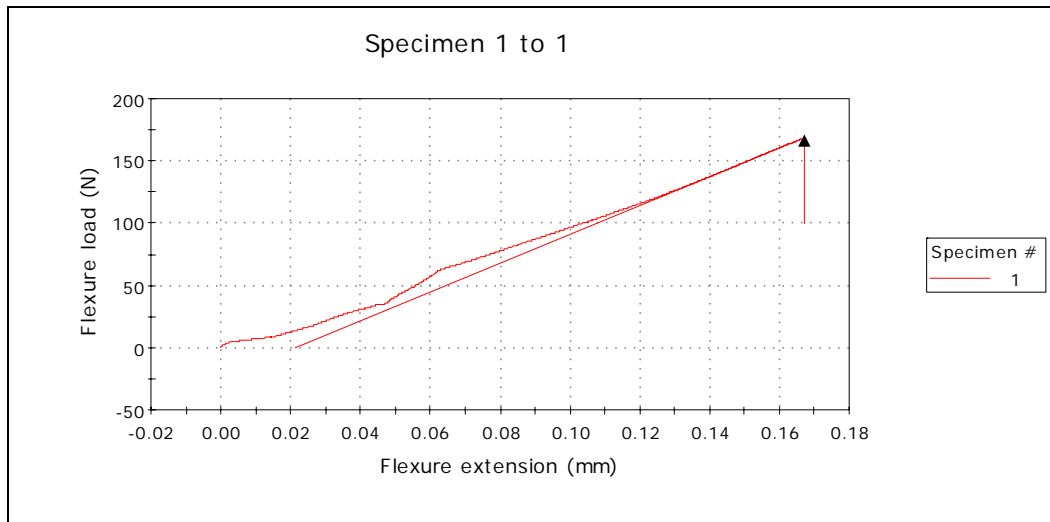


Figura D - 16 - Curva carregamento vs. flecha para o corpo-de-prova 5 da placa de traço T2.

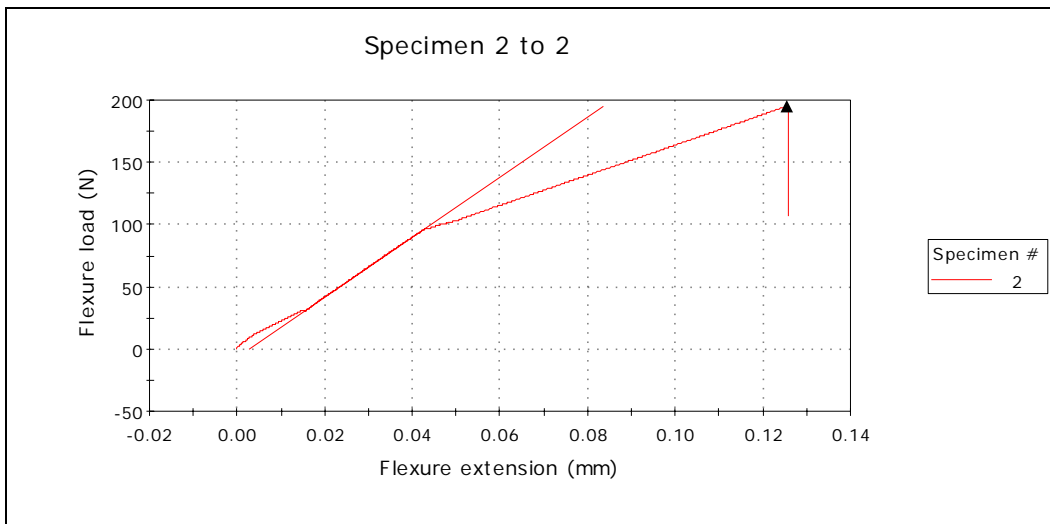


Figura D - 17 - Curva carregamento vs. flecha para o corpo-de-prova 6 da placa de traço T2.

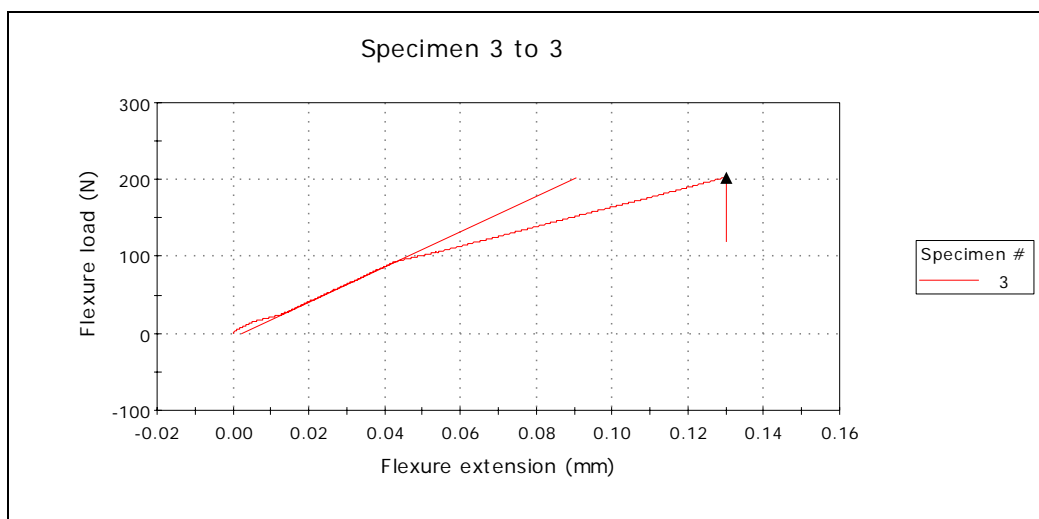


Figura D - 18 - Curva carregamento vs. flecha para o corpo-de-prova 7 da placa de traço T2.

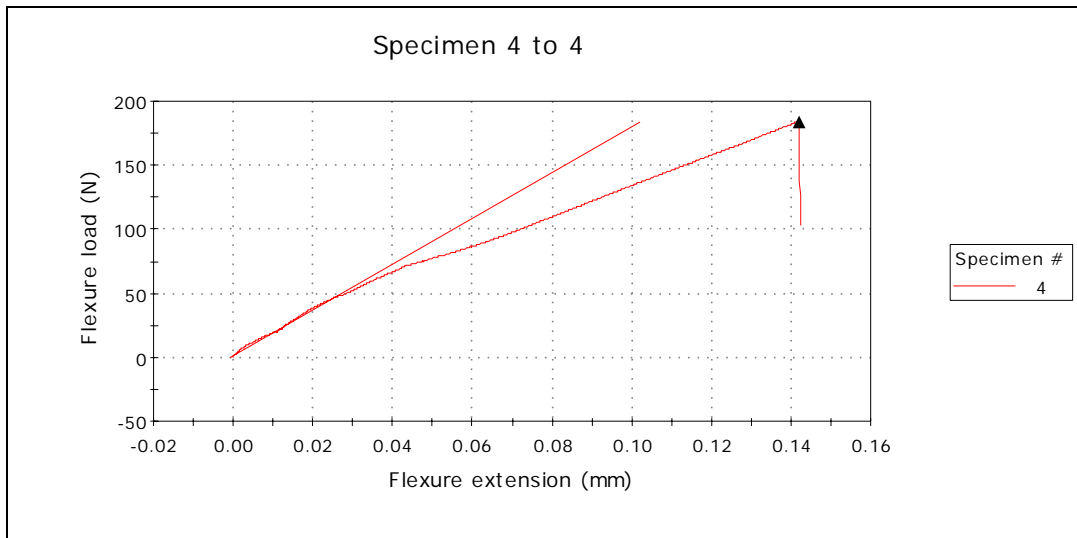


Figura D - 19 - Curva carregamento vs. flecha para o corpo-de-prova 8 da placa de traço T2.

D.5. Prisma

D.5.1. Traço 1

Os resultados apresentam-se da Tabela D - 47 à Tabela D - 53, e na Figura D - 20.

Tabela D - 47 - Resultados da caracterização geométrica e pesagem dos corpos-de-prova, para o prisma de traço T1.

| CP | L1 (mm) | | | L2 (mm) | | | L3 (mm) | | | Volume (cm ³) | Massa (g) | δ (g/cm ³) |
|----|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|--------|--------|---------------------------|-----------|-------------------------------|
| | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | | | |
| 1 | 41,48 | 40,49 | 40,99 | 39,96 | 40,00 | 39,98 | 161,10 | 161,15 | 161,13 | 264,02 | 501,00 | 1,90 |
| 2 | 41,51 | 40,16 | 40,84 | 39,83 | 39,87 | 39,85 | 160,50 | 160,60 | 160,55 | 261,26 | 496,15 | 1,90 |
| 3 | 41,95 | 39,77 | 40,86 | 39,90 | 39,96 | 39,93 | 160,75 | 160,85 | 160,80 | 262,35 | 496,47 | 1,89 |
| 4 | 41,16 | 40,72 | 40,94 | 40,17 | 40,12 | 40,15 | 160,50 | 160,65 | 160,58 | 263,91 | 501,42 | 1,90 |
| 5 | 41,77 | 40,74 | 41,26 | 40,44 | 40,43 | 40,44 | 160,70 | 161,00 | 160,85 | 268,32 | 510,93 | 1,90 |
| 6 | 41,28 | 40,94 | 41,11 | 40,17 | 40,93 | 40,55 | 160,50 | 160,50 | 160,50 | 267,56 | 503,17 | 1,88 |
| 7 | 40,52 | 41,44 | 40,98 | 40,19 | 40,25 | 40,22 | 161,60 | 161,55 | 161,58 | 266,31 | 505,65 | 1,90 |
| 8 | 40,97 | 41,46 | 41,22 | 40,19 | 40,23 | 40,21 | 161,50 | 161,35 | 161,43 | 267,52 | 505,92 | 1,89 |
| 9 | 41,69 | 40,72 | 41,21 | 40,21 | 40,01 | 40,11 | 161,35 | 162,00 | 161,68 | 267,21 | 504,23 | 1,89 |
| 10 | 41,42 | 40,91 | 41,17 | 40,72 | 40,69 | 40,71 | 160,60 | 160,75 | 160,68 | 269,23 | 503,93 | 1,87 |
| 11 | 40,09 | 41,41 | 40,75 | 40,56 | 40,85 | 40,71 | 160,50 | 160,60 | 160,55 | 266,31 | 496,84 | 1,87 |
| 12 | 40,56 | 40,83 | 40,70 | 40,13 | 40,31 | 40,22 | 160,80 | 160,75 | 160,78 | 263,15 | 499,86 | 1,90 |
| 13 | 40,53 | 41,63 | 41,08 | 40,24 | 40,16 | 40,20 | 160,95 | 161,05 | 161,00 | 265,88 | 503,51 | 1,89 |
| 14 | 41,39 | 41,39 | 41,39 | 40,06 | 40,05 | 40,06 | 160,90 | 161,00 | 160,95 | 266,84 | 504,33 | 1,89 |
| 15 | 41,05 | 42,23 | 41,64 | 39,94 | 40,16 | 40,05 | 160,85 | 161,30 | 161,08 | 268,62 | 508,40 | 1,89 |
| 16 | 40,99 | 41,28 | 41,14 | 40,04 | 40,16 | 40,10 | 161,10 | 161,20 | 161,15 | 265,82 | 508,73 | 1,91 |
| 17 | 41,10 | 41,36 | 41,23 | 40,09 | 40,45 | 40,27 | 161,15 | 161,25 | 161,20 | 267,65 | 505,41 | 1,89 |
| 18 | 40,56 | 41,15 | 40,86 | 40,16 | 40,01 | 40,09 | 161,25 | 161,75 | 161,50 | 264,48 | 503,50 | 1,90 |
| 19 | 40,71 | 40,39 | 40,55 | 40,39 | 40,41 | 40,40 | 161,00 | 161,15 | 161,08 | 263,88 | 504,53 | 1,91 |
| 20 | 40,93 | 40,57 | 40,75 | 40,04 | 40,39 | 40,22 | 160,85 | 160,95 | 160,90 | 263,68 | 499,18 | 1,89 |
| 21 | 41,96 | 40,00 | 40,98 | 40,28 | 40,33 | 40,31 | 160,75 | 160,95 | 160,85 | 265,68 | 502,95 | 1,89 |

Tabela D - 48 - Resultados do ensaio de módulo de deformação pelo ultrassom, realizado por diferentes operadores e obtidos para diferentes direções de medição, para o prisma de traço T1.

| CP | Longitudinal (D1) | | | | | | Espessura (D2) | | |
|----|-------------------------|-------------------|---------|-------------------|-------------------|---------|-------------------|-------------------|---------|
| | Operador 1 | | | Operador 2 | | | Operador 1 | | |
| | Tempo (µs) | Velocidade (km/s) | E (GPa) | Tempo (µs) | Velocidade (km/s) | E (GPa) | Tempo (µs) | Velocidade (km/s) | E (GPa) |
| 1 | 55,2 | 2,92 | 14,55 | 55,9 | 2,88 | 14,19 | 14,6 | 2,74 | 12,81 |
| 2 | 54,4 | 2,95 | 14,89 | 54,8 | 2,93 | 14,67 | 14,3 | 2,79 | 13,27 |
| 3 | 57,3 | 2,81 | 13,41 | 56,6 | 2,84 | 13,75 | 14,5 | 2,75 | 12,92 |
| 4 | 56,5 | 2,84 | 13,81 | 56,4 | 2,85 | 13,86 | 14,7 | 2,73 | 12,75 |
| 5 | 56,1 | 2,87 | 14,09 | 55,9 | 2,88 | 14,19 | 14,7 | 2,75 | 12,97 |
| 6 | 57,5 | 2,79 | 13,19 | 57,2 | 2,81 | 13,33 | 14,6 | 2,78 | 13,06 |
| 7 | 57,3 | 2,82 | 13,59 | 56,5 | 2,86 | 13,98 | 14,9 | 2,70 | 12,45 |
| 8 | 55,3 | 2,92 | 14,50 | 55,8 | 2,89 | 14,24 | 15,0 | 2,68 | 12,23 |
| 9 | 57,1 | 2,83 | 13,62 | 57,6 | 2,81 | 13,38 | 14,7 | 2,73 | 12,64 |
| 10 | 58,0 | 2,77 | 12,93 | 57,6 | 2,79 | 13,11 | 14,9 | 2,73 | 12,57 |
| 11 | 54,6 | 2,94 | 14,52 | 55,2 | 2,91 | 14,20 | 14,4 | 2,83 | 13,42 |
| 12 | 55,1 | 2,92 | 14,56 | 54,7 | 2,94 | 14,77 | 14,8 | 2,72 | 12,63 |
| 13 | 53,8 | 2,99 | 15,26 | 54,1 | 2,98 | 15,09 | 14,3 | 2,81 | 13,47 |
| 14 | 56,0 | 2,87 | 14,05 | 55,5 | 2,90 | 14,31 | 14,9 | 2,69 | 12,29 |
| 15 | 53,4 | 3,02 | 15,50 | 53,1 | 3,03 | 15,67 | 14,5 | 2,76 | 12,99 |
| 16 | 56,6 | 2,85 | 13,96 | 55,6 | 2,90 | 14,47 | 14,7 | 2,73 | 12,82 |
| 17 | 57,7 | 2,79 | 13,26 | 58,1 | 2,77 | 13,08 | 14,9 | 2,70 | 12,41 |
| 18 | 56,6 | 2,85 | 13,95 | 55,8 | 2,89 | 14,35 | 14,8 | 2,71 | 12,57 |
| 19 | 55,6 | 2,90 | 14,44 | 54,8 | 2,94 | 14,87 | 14,9 | 2,71 | 12,65 |
| 20 | 55,1 | 2,92 | 14,53 | 55,8 | 2,88 | 14,17 | 14,7 | 2,74 | 12,75 |
| 21 | 58,9 | 2,73 | 12,71 | 56,9 | 2,83 | 13,62 | 14,7 | 2,74 | 12,81 |
| | média | | 14,06 | média | | 14,16 | média | | 12,78 |
| | desvio-padrão | | 0,74 | desvio-padrão | | 0,66 | desvio-padrão | | 0,33 |
| | coeficiente de variação | | 5,25% | coef. de variação | | 4,64% | coef. de variação | | 2,61% |

Tabela D - 49 - Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão realizado na prensa EMIC, para o prisma de traço T1.

| CP | Carga de ruptura (N) | Fator de cálculo de tensão (mm ²) | σ ruptura (MPa) |
|----|-------------------------|---|------------------------|
| 12 | 1112 | 0,00228 | 2,53 |
| 13 | 1039 | 0,00226 | 2,35 |
| 14 | 1228 | 0,00226 | 2,77 |
| 15 | 1286 | 0,00225 | 2,89 |
| 16 | 1306 | 0,00227 | 2,96 |
| 19 | 1198 | 0,00227 | 2,72 |
| 21 | 1302 | 0,00225 | 2,93 |
| 20 | 1165 | 0,00228 | 2,65 |
| | média | | 2,73 |
| | desvio-padrão | | 0,21 |
| | coeficiente de variação | | 7,76% |

Tabela D - 50 - Resultados do ensaio de resistência à compressão realizado na prensa EMIC, para o prisma de traço T1.

| CP | Carga de ruptura (N) | σ ruptura (MPa) |
|----------|----------------------|------------------------|
| 12 | 18646 | 11,65 |
| 13 | 19294 | 12,06 |
| 14 | 18521 | 11,58 |
| 15 | 19007 | 11,88 |
| média | 18867 | 11,79 |
| desv pad | 351 | 0,22 |
| coef var | 1,86% | 1,86% |

Tabela D - 51 - Medidas de deslocamento, fornecidas pelo extensômetro, e de carga máxima atingida para o ensaio de módulo de deformação à compressão, para o prisma de traço T1.

| CP | L0% (mm) | L10% (mm) | L20% (mm) | L30% (mm) | L40% (mm) | L50% (mm) | L60% (mm) | L70% (mm) | L80% (mm) | Fmax (kN) |
|------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 12 | 0,00037 | 0,00215 | 0,00383 | 0,00514 | 0,00682 | 0,00887 | 0,01065 | 0,01289 | 0,01597 | 19,68 |
| 13 | 0,00075 | 0,00308 | 0,00523 | 0,00710 | 0,00934 | 0,01186 | 0,01476 | 0,01821 | 0,02288 | 18,58 |
| 14 | 0,00047 | 0,00243 | 0,00420 | 0,00551 | 0,00738 | 0,00981 | 0,01280 | 0,01644 | 0,01747 | 15,87 |
| 15 | 0,00028 | 0,00131 | 0,00252 | 0,00374 | 0,00523 | 0,00672 | 0,00785 | 0,00887 | 0,01009 | 19,14 |
| 16-1 | 0,00056 | 0,00308 | 0,00542 | 0,00729 | 0,00971 | 0,01326 | 0,01737 | 0,02139 | 0,02578 | 17,11 |
| 16-2 | 0,00019 | 0,00131 | 0,00262 | 0,00383 | 0,00514 | 0,00682 | 0,00794 | 0,00962 | 0,01167 | 18,93 |
| 19-1 | 0,00019 | 0,00065 | 0,00168 | 0,00308 | 0,00448 | 0,00616 | 0,00775 | 0,00990 | 0,01289 | 18,27 |
| 19-2 | 0,00075 | 0,00140 | 0,00233 | 0,00355 | 0,00504 | 0,00691 | 0,00841 | 0,01055 | 0,01280 | 19,76 |
| 21-1 | 0,00121 | 0,00383 | 0,00626 | 0,00794 | 0,00999 | 0,01298 | 0,01691 | 0,02204 | 0,02391 | 18,35 |
| 21-2 | 0,00075 | 0,00262 | 0,00476 | 0,00644 | 0,00831 | 0,01074 | 0,01308 | 0,01634 | 0,02120 | 18,63 |
| 20-1 | 0,00019 | 0,00075 | 0,00159 | 0,00252 | 0,00364 | 0,00523 | 0,00448 | 0,00616 | 0,00887 | 16,20 |
| 20-2 | 0,00075 | 0,00196 | 0,00392 | 0,00560 | 0,00738 | 0,00971 | 0,01224 | 0,01522 | 0,01980 | 18,48 |

Carga de ruptura estimada: 18870N

Tabela D - 52 - Resultados de tensão e deformação para o ensaio de módulo de deformação à compressão, para o prisma de traço T1.

| CP | % da carga de ruptura | 0% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% |
|------|-----------------------|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | σ (MPa) | 0 | 1,18 | 2,36 | 3,54 | 4,72 | 5,90 | 7,08 | 8,26 | 9,44 |
| 12 | ϵ (mm/mm) | 0 | 0,000089 | 0,000173 | 0,000239 | 0,000323 | 0,000425 | 0,000514 | 0,000626 | 0,000780 |
| 13 | ϵ (mm/mm) | 0 | 0,000117 | 0,000224 | 0,000318 | 0,000430 | 0,000556 | 0,000701 | 0,000873 | 0,001107 |
| 14 | ϵ (mm/mm) | 0 | 0,000098 | 0,000187 | 0,000252 | 0,000346 | 0,000467 | 0,000617 | 0,000799 | 0,000850 |
| 15 | ϵ (mm/mm) | 0 | 0,000052 | 0,000112 | 0,000173 | 0,000248 | 0,000322 | 0,000379 | 0,000430 | 0,000491 |
| 16-1 | ϵ (mm/mm) | 0 | 0,000126 | 0,000243 | 0,000337 | 0,000458 | 0,000635 | 0,000841 | 0,001042 | 0,001261 |
| 16-2 | ϵ (mm/mm) | 0 | 0,000056 | 0,000122 | 0,000182 | 0,000248 | 0,000332 | 0,000388 | 0,000472 | 0,000574 |
| 19-1 | ϵ (mm/mm) | 0 | 0,000023 | 0,000075 | 0,000145 | 0,000215 | 0,000299 | 0,000378 | 0,000486 | 0,000635 |
| 19-2 | ϵ (mm/mm) | 0 | 0,000033 | 0,000079 | 0,000140 | 0,000215 | 0,000308 | 0,000383 | 0,000490 | 0,000603 |
| 21-1 | ϵ (mm/mm) | 0 | 0,000131 | 0,000253 | 0,000337 | 0,000439 | 0,000589 | 0,000785 | 0,001042 | 0,001135 |
| 21-2 | ϵ (mm/mm) | 0 | 0,000094 | 0,000201 | 0,000285 | 0,000378 | 0,000500 | 0,000617 | 0,000780 | 0,001023 |
| 20-1 | ϵ (mm/mm) | 0 | 0,000028 | 0,00007 | 0,000117 | 0,000173 | 0,000252 | 0,000215 | 0,000299 | 0,000434 |
| 20-2 | ϵ (mm/mm) | 0 | 6,05E-05 | 0,000159 | 0,000243 | 0,000332 | 0,000448 | 0,000575 | 0,000724 | 0,000953 |

Tabela D - 53 - Valores de módulo de deformação à compressão e tensão de ruptura, pelo extensômetro, para o prisma de traço T1.

| CP | ϵ 10% (mm/mm) | ϵ 50% (mm/mm) | s 10% (MPa) | s 50% (MPa) | Einicial (GPa) | E tg50% (GPa) | E 10%/50% (GPa) | σ ruptura (MPa) |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------|----------------|-------------------|------------------|-----------------------|------------------------------|
| 12 | 0,000089 | 0,000425 | 1,18 | 5,90 | 16,74 | 12,05 | 14,04 | 12,30 |
| 13 | 0,000117 | 0,000556 | 1,18 | 5,90 | 12,92 | 8,71 | 10,75 | 11,61 |
| 14 | 0,000098 | 0,000467 | 1,18 | 5,90 | 14,97 | 10,29 | 12,78 | 9,92 |
| 15 | 0,000052 | 0,000322 | 1,18 | 5,90 | 18,69 | 18,69 | 17,44 | 11,96 |
| 16-1 | 0,000126 | 0,000635 | 1,18 | 5,90 | 11,24 | 7,40 | 9,27 | 10,69 |
| 16-2 | 0,000056 | 0,000332 | 1,18 | 5,90 | 20,80 | 15,90 | 17,12 | 11,83 |
| 19-1 | 0,000023 | 0,000299 | 1,18 | 5,90 | 22,97 | 14,62 | 17,12 | 11,42 |
| 19-2 | 0,000033 | 0,000308 | 1,18 | 5,90 | 22,76 | 14,64 | 17,12 | 12,35 |
| 21-1 | 0,000131 | 0,000589 | 1,18 | 5,90 | 11,94 | 8,03 | 10,31 | 11,47 |
| 21-2 | 0,000094 | 0,000500 | 1,18 | 5,90 | 14,67 | 9,57 | 11,62 | 11,64 |
| 20-1* | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 20-2 | 0,000061 | 0,000448 | 1,18 | 5,90 | 15,86 | 10,17 | 12,17 | 11,55 |
| média | | | | | 16,49 | 11,14 | 13,61 | 11,48 |
| desvio-padrão | | | | | 4,31 | 3,01 | 3,11 | 0,72 |
| coeficiente de variação | | | | | 26,13% | 27,04% | 22,82% | 6,27% |

* não foi possível interpolar uma curva para os dados obtidos para este corpo-de-prova

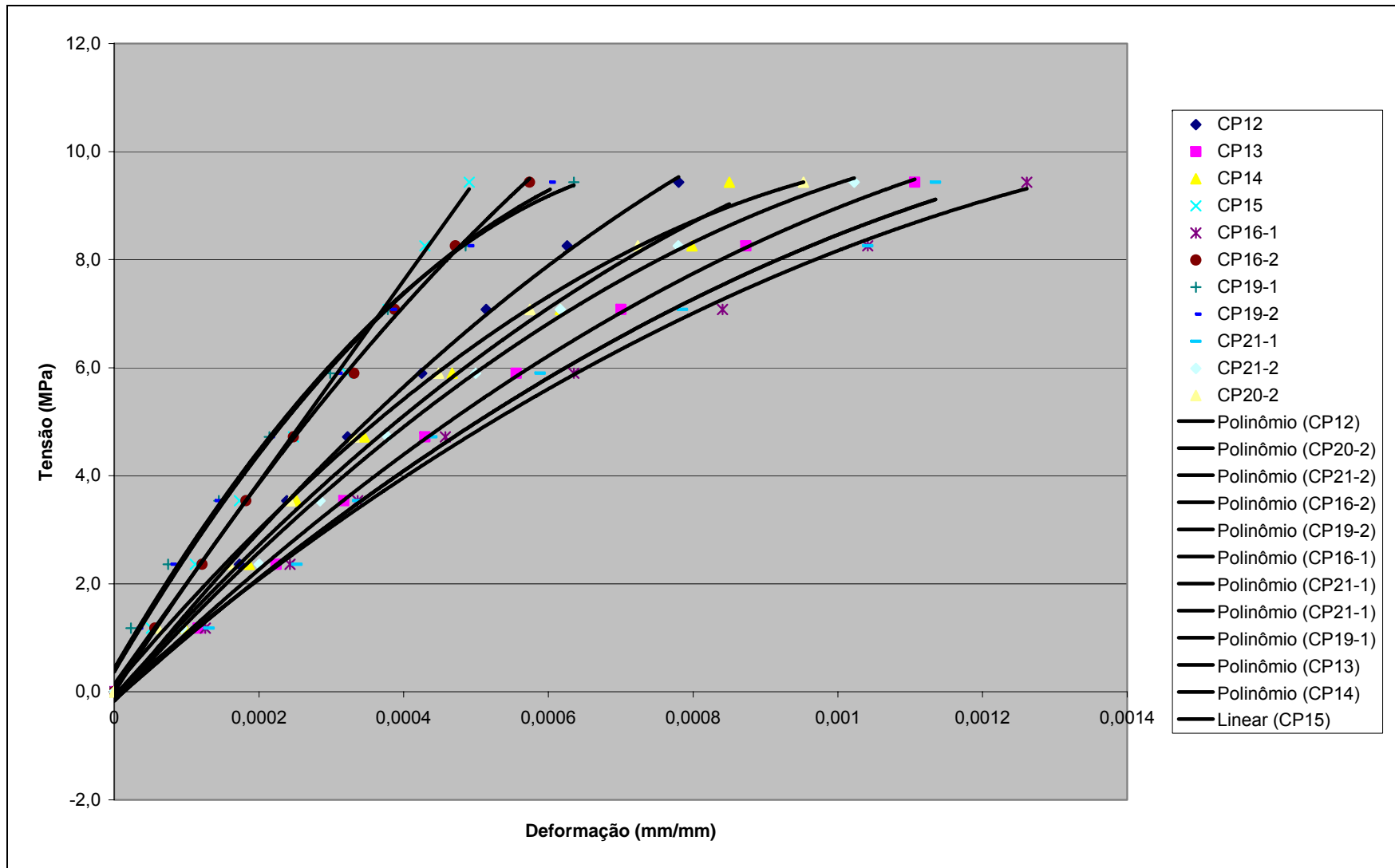


Figura D - 20 - Curvas tensão-deformação para o prisma de traço T1.

D.5.2. Traço 2

Os resultados são apresentados da Tabela D - 54 à Tabela D - 60, e na Figura D - 21.

Tabela D - 54 - Resultados da caracterização geométrica e pesagem dos corpos-de-prova, para o prisma de traço T2.

| CP | L1 (mm) | | | L2 (mm) | | | L3 (mm) | | | Volume (cm ³) | Massa (g) | δ (g/cm ³) |
|----|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|--------|--------|---------------------------|-----------|------------------------|
| | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | 1 | 2 | média | | | |
| 1 | 40,31 | 41,90 | 41,11 | 39,83 | 40,06 | 39,95 | 160,00 | 160,00 | 160,00 | 262,71 | 463,28 | 1,76 |
| 2 | 40,70 | 40,95 | 40,83 | 40,12 | 40,38 | 40,25 | 160,15 | 160,05 | 160,10 | 263,08 | 463,06 | 1,76 |
| 3 | 40,28 | 40,90 | 40,59 | 39,71 | 40,03 | 39,87 | 159,90 | 159,85 | 159,88 | 258,73 | 460,19 | 1,78 |
| 4 | 40,55 | 40,79 | 40,67 | 40,08 | 40,07 | 40,08 | 160,75 | 160,60 | 160,68 | 261,88 | 466,98 | 1,78 |
| 5 | 40,57 | 40,52 | 40,55 | 40,19 | 39,82 | 40,01 | 160,30 | 160,25 | 160,28 | 259,97 | 465,83 | 1,79 |
| 6 | 40,82 | 40,73 | 40,78 | 39,97 | 40,32 | 40,15 | 160,55 | 160,35 | 160,45 | 262,64 | 467,17 | 1,78 |
| 7 | 41,70 | 40,50 | 41,10 | 39,83 | 39,86 | 39,85 | 161,45 | 160,55 | 161,00 | 263,66 | 468,03 | 1,78 |
| 8 | 41,65 | 40,74 | 41,20 | 39,67 | 39,85 | 39,76 | 161,10 | 160,50 | 160,80 | 263,38 | 466,21 | 1,77 |
| 9 | 41,11 | 41,98 | 41,55 | 39,60 | 39,67 | 39,64 | 160,85 | 160,30 | 160,58 | 264,41 | 468,83 | 1,77 |
| 10 | 40,07 | 40,90 | 40,49 | 40,00 | 40,02 | 40,01 | 160,20 | 159,85 | 160,03 | 259,21 | 461,67 | 1,78 |
| 11 | 40,21 | 40,11 | 40,16 | 40,18 | 40,22 | 40,20 | 160,00 | 159,60 | 159,80 | 257,99 | 462,13 | 1,79 |
| 12 | 40,47 | 40,78 | 40,63 | 39,94 | 40,26 | 40,10 | 159,80 | 159,40 | 159,60 | 260,00 | 464,56 | 1,79 |
| 13 | 40,61 | 41,31 | 40,96 | 40,08 | 39,90 | 39,99 | 160,10 | 159,75 | 159,93 | 261,96 | 464,92 | 1,77 |
| 14 | 40,47 | 40,93 | 40,70 | 40,11 | 40,14 | 40,13 | 159,80 | 159,70 | 159,75 | 260,89 | 466,19 | 1,79 |
| 15 | 40,25 | 41,01 | 40,63 | 39,69 | 40,12 | 39,91 | 159,80 | 159,70 | 159,75 | 259,01 | 463,92 | 1,79 |
| 16 | 41,25 | 41,45 | 41,35 | 40,15 | 40,10 | 40,13 | 160,80 | 160,60 | 160,70 | 266,63 | 465,19 | 1,74 |
| 17 | 41,08 | 40,21 | 40,65 | 40,38 | 40,57 | 40,48 | 160,85 | 160,65 | 160,75 | 264,45 | 466,24 | 1,76 |
| 18 | 40,41 | 40,95 | 40,68 | 39,89 | 40,22 | 40,06 | 160,90 | 160,70 | 160,80 | 262,01 | 461,30 | 1,76 |
| 19 | 40,94 | 40,50 | 40,72 | 39,96 | 40,14 | 40,05 | 159,80 | 159,70 | 159,75 | 260,53 | 463,39 | 1,78 |
| 20 | 40,94 | 40,64 | 40,79 | 40,24 | 40,17 | 40,21 | 159,85 | 159,80 | 159,83 | 262,11 | 464,07 | 1,77 |
| 21 | 40,79 | 41,01 | 40,90 | 40,10 | 40,01 | 40,06 | 160,00 | 159,90 | 159,95 | 262,04 | 465,59 | 1,78 |

Tabela D - 55 - Resultados do ensaio de módulo de deformação pelo ultrassom, obtidos para diferentes direções de medição, para o prisma de traço T2.

| CP | Longitudinal (D1) | | | Espessura (D2) | | |
|----|-------------------------|-------------------|---------|-------------------|-------------------|---------|
| | Tempo (µs) | Velocidade (km/s) | E (GPa) | Tempo (µs) | Velocidade (km/s) | E (GPa) |
| 1 | 91,1 | 1,76 | 4,90 | 23,4 | 1,71 | 4,62 |
| 2 | 92,2 | 1,74 | 4,78 | 23,3 | 1,73 | 4,73 |
| 3 | 89,8 | 1,78 | 5,07 | 23,0 | 1,73 | 4,81 |
| 4 | 91,1 | 1,76 | 4,99 | 22,8 | 1,76 | 4,96 |
| 5 | 89,1 | 1,80 | 5,22 | 22,1 | 1,81 | 5,28 |
| 6 | 91,0 | 1,76 | 4,98 | 23,1 | 1,74 | 4,83 |
| 7 | 89,2 | 1,80 | 5,20 | 22,1 | 1,80 | 5,19 |
| 8 | 89,7 | 1,79 | 5,12 | 22,0 | 1,81 | 5,20 |
| 9 | 92,2 | 1,74 | 4,84 | 23,0 | 1,72 | 4,74 |
| 10 | 87,5 | 1,83 | 5,36 | 22,6 | 1,77 | 5,02 |
| 11 | 88,2 | 1,81 | 5,29 | 22,8 | 1,76 | 5,01 |
| 12 | 88,2 | 1,81 | 5,27 | 22,0 | 1,82 | 5,34 |
| 13 | 90,0 | 1,78 | 5,04 | 22,4 | 1,79 | 5,09 |
| 14 | 89,6 | 1,78 | 5,11 | 22,6 | 1,78 | 5,07 |
| 15 | 89,2 | 1,79 | 5,17 | 21,8 | 1,83 | 5,40 |
| 16 | 95,0 | 1,69 | 4,49 | 23,7 | 1,69 | 4,50 |
| 17 | 96,0 | 1,67 | 4,45 | 24,3 | 1,67 | 4,40 |
| 18 | 93,6 | 1,72 | 4,68 | 22,8 | 1,76 | 4,89 |
| 19 | 91,4 | 1,75 | 4,89 | 23,6 | 1,70 | 4,61 |
| 20 | 91,3 | 1,75 | 4,88 | 23,1 | 1,74 | 4,83 |
| 21 | 89,2 | 1,79 | 5,14 | 22,4 | 1,79 | 5,11 |
| | média | | 4,99 | média | | 4,94 |
| | desvio-padrão | | 0,25 | desvio-padrão | | 0,28 |
| | coeficiente de variação | | 4,98% | coef. de variação | | 5,60% |

Tabela D - 56 - Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão realizado na prensa EMIC, para o prisma de traço T2.

| CP | Carga de ruptura (N) | Fator de cálculo de tensão (mm ²) | σ ruptura (MPa) |
|----|-------------------------|---|------------------------|
| 9 | 350 | 0,00230 | 0,80 |
| 10 | 392 | 0,00231 | 0,91 |
| 11 | 476 | 0,00231 | 1,10 |
| 12 | 406 | 0,00230 | 0,93 |
| 14 | 381 | 0,00229 | 0,87 |
| 15 | 384 | 0,00232 | 0,89 |
| 16 | 417 | 0,00225 | 0,94 |
| 18 | 387 | 0,00230 | 0,89 |
| | média | | 0,92 |
| | desvio-padrão | | 0,09 |
| | coeficiente de variação | | 9,30% |

Tabela D - 57 - Resultados do ensaio de resistência à compressão realizado na prensa EMIC, para o prisma de traço T2.

| CP | Carga de ruptura (N) | σ ruptura (MPa) |
|----------|----------------------|------------------------|
| 9 | 4387 | 2,74 |
| 10 | 4936 | 3,09 |
| 11 | 4823 | 3,01 |
| 12 | 4917 | 3,07 |
| 9 | 4297 | 2,69 |
| média | 4672 | 2,92 |
| desv pad | 306 | 0,19 |
| coef var | 6,55% | 6,55% |

Tabela D - 58 - Medidas de deslocamento, fornecidas pelo extensômetro, e de carga máxima atingida para o ensaio de módulo de deformação à compressão, para o prisma de traço T2.

| CP | L0% (mm) | L10% (mm) | L20% (mm) | L30% (mm) | L40% (mm) | L50% (mm) | L60% (mm) | L70% (mm) | L80% (mm) | Fmax (kN) |
|----|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 10 | 0,00075 | 0,00121 | 0,00252 | 0,00383 | 0,00523 | 0,00710 | 0,00943 | 0,01270 | 0,01728 | 4,96 |
| 11 | 0,00112 | 0,00177 | 0,00346 | 0,00504 | 0,00663 | 0,00850 | 0,01065 | 0,01317 | 0,01597 | 4,78 |
| 12 | 0,00065 | 0,00121 | 0,00271 | 0,00402 | 0,00542 | 0,00700 | 0,00878 | 0,01093 | 0,01354 | 5,55 |
| 14 | 0,00196 | 0,00271 | 0,00476 | 0,00644 | 0,00841 | 0,01137 | 0,01691 | 0,02121 | 0,02840 | 4,68 |
| 14 | 0,00140 | 0,00233 | 0,00448 | 0,00616 | 0,00785 | 0,00999 | 0,01214 | 0,01504 | 0,01859 | 5,00 |
| 15 | 0,00149 | 0,00215 | 0,00374 | 0,00523 | 0,00682 | 0,00887 | 0,01111 | 0,01401 | 0,01775 | 5,16 |
| 15 | 0,00056 | 0,00093 | 0,00196 | 0,00299 | 0,00402 | 0,00514 | 0,00644 | 0,00803 | 0,01009 | 5,26 |
| 16 | 0,00224 | 0,00318 | 0,00511 | 0,00729 | 0,00943 | 0,01289 | 0,01597 | 0,01859 | 0,02036 | 4,04 |
| 16 | 0,00084 | 0,00149 | 0,00299 | 0,00458 | 0,00607 | 0,00794 | 0,01009 | 0,01326 | 0,01681 | 4,18 |
| 18 | 0,00243 | 0,00346 | 0,00635 | 0,00878 | 0,01158 | 0,01606 | 0,02139 | 0,02877 | 0,03633 | 4,59 |
| 18 | 0,00196 | 0,00262 | 0,00420 | 0,00560 | 0,00719 | 0,00943 | 0,01195 | 0,01522 | 0,01915 | 4,54 |

Carga de ruptura estimada: 4670N

Tabela D - 59 - Resultados de tensão e deformação para o ensaio de módulo de deformação à compressão, para o prisma de traço T2.

| CP | % da carga de ruptura | 0% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% |
|------|-----------------------|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | σ (MPa) | 0,00 | 0,29 | 0,58 | 0,88 | 1,17 | 1,46 | 1,75 | 2,04 | 2,34 |
| 10 | ε (mm/mm) | 0 | 0,000023 | 0,000089 | 0,000154 | 0,000224 | 0,000318 | 0,000434 | 0,000598 | 0,000827 |
| 11 | ε (mm/mm) | 0 | 0,000033 | 0,000117 | 0,000196 | 0,000276 | 0,000369 | 0,000477 | 0,000603 | 0,000743 |
| 12 | ε (mm/mm) | 0 | 0,000028 | 0,000103 | 0,000169 | 0,000239 | 0,000318 | 0,000407 | 0,000514 | 0,000645 |
| 14-1 | ε (mm/mm) | 0 | 0,000038 | 0,000140 | 0,000224 | 0,000323 | 0,000561 | 0,000748 | 0,000813 | 0,000822 |
| 14-2 | ε (mm/mm) | 0 | 0,000047 | 0,000154 | 0,000238 | 0,000323 | 0,000430 | 0,000537 | 0,000682 | 0,000860 |
| 15-1 | ε (mm/mm) | 0 | 0,000033 | 0,000113 | 0,000187 | 0,000267 | 0,000369 | 0,000481 | 0,000626 | 0,000813 |
| 15-2 | ε (mm/mm) | 0 | 0,000019 | 0,000070 | 0,000122 | 0,000173 | 0,000229 | 0,000294 | 0,000374 | 0,000477 |
| 16-1 | ε (mm/mm) | 0 | 0,000047 | 0,000144 | 0,000253 | 0,000360 | 0,000533 | 0,000687 | 0,000818 | 0,000906 |
| 16-2 | ε (mm/mm) | 0 | 0,000033 | 0,000108 | 0,000187 | 0,000262 | 0,000355 | 0,000463 | 0,000621 | 0,000799 |
| 18-1 | ε (mm/mm) | 0 | 0,000052 | 0,000196 | 0,000318 | 0,000458 | 0,000682 | 0,000948 | 0,001317 | 0,001695 |
| 18-2 | ε (mm/mm) | 0 | 0,000033 | 0,000112 | 0,000182 | 0,000262 | 0,000374 | 0,000500 | 0,000663 | 0,000860 |

Tabela D - 60 - Valores de módulo de deformação à compressão e tensão de ruptura, pelo extensômetro, para o prisma de traço T2.

| CP | ϵ 10% (mm/mm) | ϵ 50% (mm/mm) | s 10% (MPa) | s 50% (MPa) | Einicial (GPa) | E tg50% (GPa) | E 10%/50% (GPa) | σ ruptura (MPa) |
|---|---------------------------|---------------------------|----------------|----------------|-------------------|------------------|-----------------------|------------------------------|
| 10 | 0,000023 | 0,000318 | 0,29 | 1,46 | 5,16 | 3,22 | 3,96 | 3,10 |
| 11 | 0,000033 | 0,000369 | 0,29 | 1,46 | 4,48 | 3,03 | 3,47 | 2,99 |
| 12 | 0,000028 | 0,000318 | 0,29 | 1,46 | 5,25 | 3,53 | 4,03 | 3,47 |
| 14-1 | 0,000038 | 0,000561 | 0,29 | 1,46 | 3,18 | 2,09 | 2,23 | 2,93 |
| 14-2 | 0,000047 | 0,000430 | 0,29 | 1,46 | 3,96 | 2,68 | 3,05 | 3,13 |
| 15-1 | 0,000033 | 0,000369 | 0,29 | 1,46 | 4,62 | 2,92 | 3,47 | 3,23 |
| 15-2 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 16-1 | 0,000047 | 0,000533 | 0,29 | 1,46 | 3,05 | 2,23 | 2,40 | 2,53 |
| 16-2 | 0,000033 | 0,000365 | 0,29 | 1,46 | 4,76 | 3,02 | 3,62 | 2,61 |
| 18-1 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 18-2 | 0,000033 | 0,000374 | 0,29 | 1,46 | 4,54 | 2,83 | 3,43 | 2,84 |
| média | | | | | 4,33 | 2,84 | 3,30 | 2,98 |
| desvio-padrão | | | | | 0,79 | 0,45 | 0,63 | 0,30 |
| coeficiente de variação | | | | | 18,23% | 15,97% | 19,07% | 9,93% |
| * Estes valores foram excluídos dos cálculos de média, desvio-padrão e coef. de variação, pois são muito discrepantes (Einicial de 7,26 e 2,42GPa, respectivamente) | | | | | | | | |

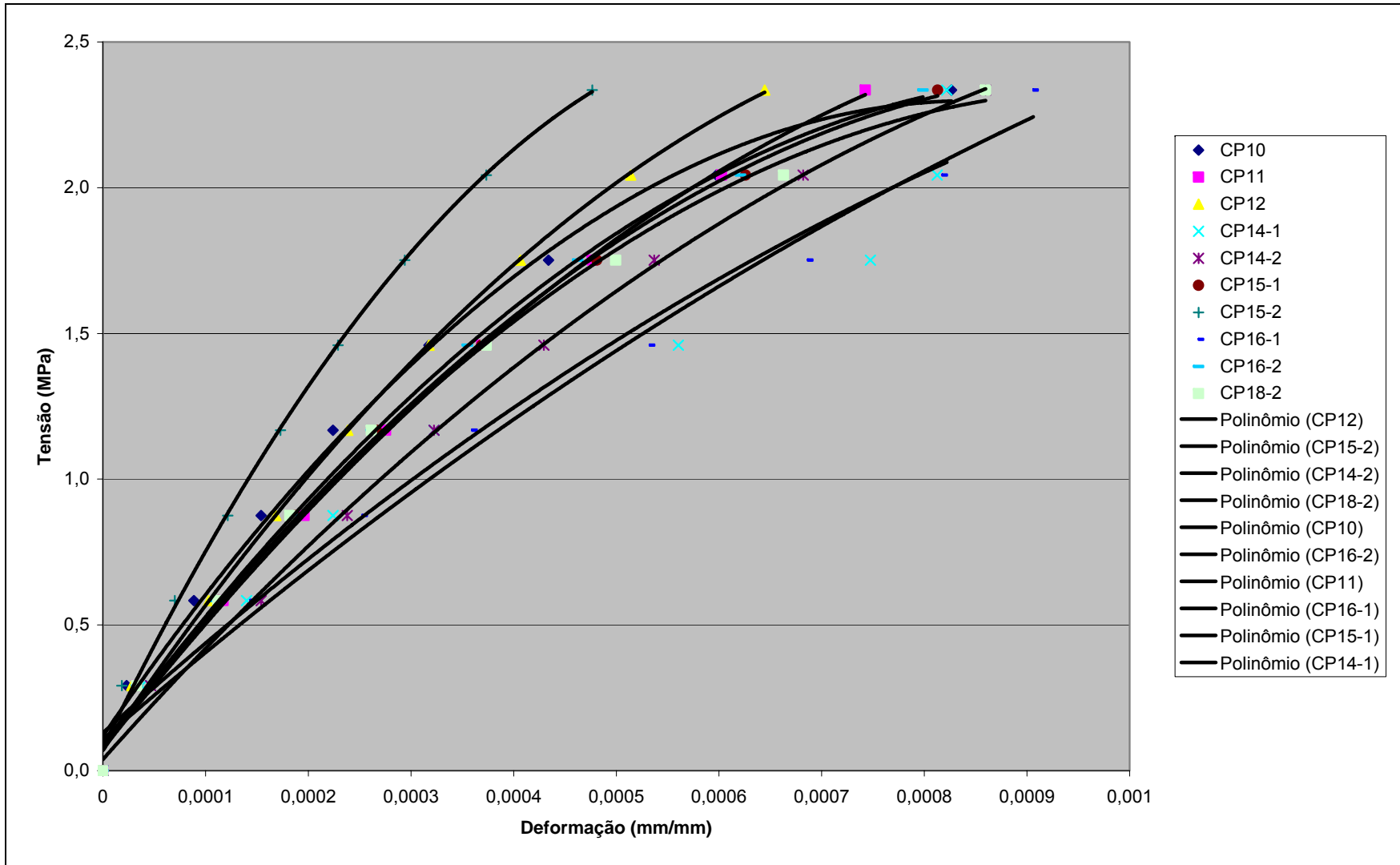


Figura D - 21 - Curvas tensão-deformação para o prisma de traço T2.

ANEXO E. Análise estatística dos dados

E.1. Barra

E.1.1. Traço 1

As análises encontram-se na Tabela E - 1 e Tabela E - 2.

Tabela E - 1 - Análise da influência do modo de posicionamento do corpo-de-prova, no ensaio de módulo pela frequência de ressonância, para a barra de traço T1.

| Comparação/ dados emparelhados/ modo de posicionamento do CP (frequência de ressonância) | | | |
|--|------------------|---|---------|
| CP | E diag. (GPa) | E horiz. (GPa) | d (GPa) |
| 1 | 12,12 | 10,60 | 1,53 |
| 2 | 9,95 | 10,29 | -0,34 |
| 3 | 10,05 | 10,17 | -0,12 |
| 4 | 11,95 | 11,89 | 0,06 |
| 5 | 11,61 | 11,61 | 0,00 |
| 6 | 11,55 | 11,60 | -0,06 |
| 7 | 11,62 | 11,62 | 0,00 |
| 8 | 11,64 | 12,20 | -0,57 |
| 9 | 11,58 | 11,84 | -0,26 |
| 10 | 10,90 | 11,04 | -0,14 |
| 11 | 11,29 | 11,13 | 0,16 |
| 12 | 11,75 | 11,91 | -0,16 |
| 13 | 11,61 | 11,62 | -0,01 |
| 14 | 11,36 | 11,45 | -0,09 |
| 15 | 11,14 | 10,66 | 0,47 |
| 16 | 12,70 | 12,84 | -0,14 |
| 17 | 11,82 | 12,46 | -0,64 |
| 18 | 11,25 | 11,47 | -0,22 |
| 19 | 11,43 | 11,70 | -0,27 |
| 20 | 12,02 | 12,04 | -0,02 |
| média | 11,47 | 11,51 | -0,04 |
| desv. pad. | 0,63 | 0,69 | 0,44 |
| coef. var. | 5,54% | 6,03% | - |
| dmédio | -0,04 | Conclusão: como $ t < t_{crit}$, aceito H_0 . Logo, as médias são iguais. | |
| sd | 0,44 | | |
| n | 20 | | |
| Δ | 0,00 | | |
| t | -0,41 | | |
| G.L. | 19 | | |
| α | 0,05 | | |
| tcrit. | 2,09 | | |

Tabela E - 2 - Análise da influência do tipo de ensaio para determinação do módulo (ultrassom ou frequência de ressonância), para a barra de traço T1.

| Comparação/ dados emparelhados/ método de medida do módulo de deformação | | | |
|--|------------------|--|---------|
| CP | Eultrassom (GPa) | E freq. diag. (GPa) | d (GPa) |
| 1 | 11,99 | 12,12 | -0,14 |
| 2 | 11,92 | 9,95 | 1,98 |
| 3 | 11,03 | 10,05 | 0,98 |
| 4 | 13,12 | 11,95 | 1,17 |
| 5 | 12,43 | 11,61 | 0,83 |
| 6 | 12,96 | 11,55 | 1,41 |
| 7 | 13,04 | 11,62 | 1,42 |
| 8 | 13,72 | 11,64 | 2,08 |
| 9 | 13,46 | 11,58 | 1,88 |
| 10 | 13,16 | 10,90 | 2,26 |
| 11 | 12,51 | 11,29 | 1,22 |
| 12 | 13,19 | 11,75 | 1,43 |
| 13 | 12,70 | 11,61 | 1,09 |
| 14 | 12,93 | 11,36 | 1,57 |
| 15 | 11,28 | 11,14 | 0,14 |
| 16 | 13,72 | 12,70 | 1,02 |
| 17 | 13,14 | 11,82 | 1,31 |
| 18 | 12,00 | 11,25 | 0,75 |
| 19 | 12,80 | 11,43 | 1,37 |
| 20 | 12,95 | 12,02 | 0,93 |
| média | 12,70 | 11,47 | 1,23 |
| desv. pad. | 0,74 | 0,63 | 0,59 |
| coef. var. | 5,80% | 5,54% | - |
| dmédio | 1,23 | Conclusão: como $ t > t_{crit}$, rejeito H_0 . Logo, as médias não são iguais. | |
| sd | 0,59 | | |
| n | 20 | | |
| Δ | 0,00 | | |
| t | 9,31 | | |
| G.L. | 19 | | |
| α | 0,05 | | |
| t _{crit.} | 2,09 | | |

E.1.2. Traço 2

A única análise realizada refere-se à influência do método de determinação do módulo de deformação e encontra-se na Tabela E - 3.

Tabela E - 3 - Análise da influência do tipo de ensaio para determinação do módulo (ultrassom ou frequência de ressonância), para a barra de traço T2.

| Comparação/ dados emparelhados/ método de determinação do módulo de deformação | | | |
|--|-------------------|---|---------|
| CP | E ultrassom (GPa) | E freq. diag. (GPa) | d (GPa) |
| 1 | 6,09 | 6,87 | -0,78 |
| 2 | 6,29 | 6,45 | -0,16 |
| 3 | 5,65 | 6,22 | -0,57 |
| média | 6,01 | 6,51 | -0,50 |
| desv. pad. | 0,33 | 0,33 | 0,31 |
| coef. var. | 5,46% | 5,08% | - |
| dmédio | -0,50 | <i>Conclusão: como $t < t_{crit}$, aceito H_0. Logo, as médias são iguais.</i> | |
| sd | 0,31 | | |
| n | 3 | | |
| Δ | 0,00 | | |
| t | -2,76 | | |
| G.L. | 2 | | |
| α | 0,05 | | |
| t _{crit.} | 4,30 | | |

E.2. Cilindro

E.2.1. Traço 1

Os resultados das análises estão na Tabela E - 4, Tabela E - 5 e Tabela E - 6.

Tabela E - 4 - Análise da influência do tipo de ensaio para determinação do módulo (estático à compressão ou ultrassom), para o cilindro de traço T1.

| Comparação/ dados emparelhados/ método de determinação do módulo | | | |
|--|-------------------|---|---------|
| CP | E ultrassom (GPa) | E inicial compressão (GPa) | d (GPa) |
| 5 | 12,39 | 13,33 | -0,95 |
| 6 | 12,51 | 12,09 | 0,42 |
| 7 | 12,24 | 12,46 | -0,22 |
| 8 | 12,08 | 11,78 | 0,30 |
| 9 | 12,36 | 10,65 | 1,71 |
| 10 | 12,31 | 10,39 | 1,92 |
| 12 | 12,59 | 11,52 | 1,07 |
| 13 | 11,80 | 11,00 | 0,80 |
| 14 | 11,63 | 11,66 | -0,03 |
| 15 | 12,56 | 12,15 | 0,41 |
| média | 12,25 | 11,70 | 0,54 |
| desv. pad. | 0,32 | 0,88 | 0,87 |
| coef. var. | 2,60% | 7,50% | - |
| dmédio | 0,54 | <i>Conclusão: como $t < t_{crit}$, aceito H_0. Logo, as médias são iguais.</i> | |
| sd | 0,87 | | |
| n | 10 | | |
| Δ | 0,00 | | |
| t | 1,97 | | |
| G. L. | 9 | | |
| α | 0,05 | | |
| t _{crit.} | 2,26 | | |

Tabela E - 5 - Análise da influência do operador sobre os resultados de módulo de deformação pelo ultrassom, para o cilindro de traço T1.

| Comparação/ dados emparelhados/ operadores diferentes (ultrassom) | | | |
|--|------------------|--|---------|
| CP | E op. 1 (GPa) | E op. 2 (GPa) | d (GPa) |
| 1 | 12,39 | 12,52 | -0,13 |
| 2 | 12,51 | 12,71 | -0,21 |
| 3 | 12,24 | 12,57 | -0,34 |
| 4 | 12,08 | 12,21 | -0,13 |
| 5 | 12,36 | 12,63 | -0,27 |
| 6 | 12,31 | 12,05 | 0,26 |
| 7 | 12,59 | 12,59 | 0,00 |
| 8 | 11,80 | 11,80 | 0,00 |
| 9 | 11,63 | 11,69 | -0,06 |
| 10 | 12,56 | 12,77 | -0,21 |
| 11 | 11,64 | 11,70 | -0,06 |
| 12 | 12,80 | 13,01 | -0,21 |
| 13 | 12,52 | 12,66 | -0,14 |
| 14 | 11,62 | 11,62 | 0,00 |
| 15 | 11,83 | 11,90 | -0,06 |
| 16 | 11,96 | 12,03 | -0,06 |
| 17 | 11,64 | 11,77 | -0,12 |
| 18 | 12,60 | 12,53 | 0,07 |
| 19 | 11,86 | 12,31 | -0,46 |
| 20 | 12,18 | 12,25 | -0,07 |
| média | 12,16 | 12,27 | -0,11 |
| desv. pad. | 0,38 | 0,42 | 0,15 |
| coef. var. | 3,15% | 3,44% | - |
| dmédio | -0,11 | <i>Conclusão: como $t > t_{crit}$, rejeito H_0. Logo, as médias não são iguais.</i> | |
| sd | 0,15 | | |
| n | 20 | | |
| Δ | 0,00 | | |
| t | -3,21 | | |
| G. L. | 19 | | |
| α | 0,05 | | |
| t _{crit.} | 2,09 | | |

Tabela E - 6 - Análise da influência do tipo de prensa sobre os resultados de resistência à compressão, para o cilindro de traço T1.

| Resistência mecânica por prensas diferentes (dados desemparelhados) | | |
|---|-------------|---|
| CP | Remic (MPa) | Ript (MPa) |
| 1 | 11,53 | 11,90 |
| 2 | 10,61 | 11,10 |
| 3 | 11,46 | 11,68 |
| 4 | 11,17 | - |
| média | 11,19 | 11,56 |
| desv. pad. | 0,42 | 0,41 |
| coef. var. | 3,73% | 3,56% |
| t | -1,16 | Conclusão: como $ t < t_{crit}$, aceito H_0 . Logo, as médias são iguais. |
| w1 | 0,04 | |
| w2 | 0,06 | |
| v | 6,50 | |
| tcrit | 2,45 | |

E.2.2. Traço 2

Os resultados apresentam-se na Tabela E - 7 e na Tabela E - 8.

Tabela E - 7 - Análise da influência do tipo de ensaio para determinação do módulo (estático à compressão ou ultrassom), para o cilindro de traço T2.

| Comparação/ dados emparelhados/ método de determinação do módulo | | | |
|--|-------------------|--|---------|
| CP real | E ultrassom (GPa) | E inicial compressão (GPa) | d (MPa) |
| 7 | 4,28 | 4,91 | -0,62 |
| 6 | 4,49 | 4,74 | -0,24 |
| 9 | 4,40 | 4,52 | -0,13 |
| 10 | 4,22 | 5,49 | -1,27 |
| 11 | 4,50 | 4,63 | -0,13 |
| 12 | 4,25 | 5,43 | -1,17 |
| 13 | 4,26 | 4,42 | -0,16 |
| 15 | 4,42 | 5,00 | -0,58 |
| 16 | 4,55 | 4,25 | 0,31 |
| 17 | 4,44 | 4,33 | 0,11 |
| média | 4,38 | 4,77 | -0,39 |
| desv. pad. | 0,12 | 0,43 | 0,52 |
| coef. var. | 2,74% | 9,08% | - |
| dmédio | -0,39 | Conclusão: como $ t > t_{crit}$, rejeito H_0 . Logo, as médias não são iguais. | |
| sd | 0,52 | | |
| n | 10 | | |
| Δ | 0,00 | | |
| t | -2,37 | | |
| G.L. | 9 | | |
| α | 0,05 | | |
| tcrit. | 2,26 | | |

Tabela E - 8 - Análise da influência do tipo de prensa sobre os resultados de resistência à compressão, para o cilindro de traço T2.

| Resistência mecânica por prensas diferentes (dados desemparelhados) | | |
|---|-------------|---|
| CP | Remic (MPa) | Ript (MPa) |
| 1 | 3,04 | 3,16 |
| 2 | 3,26 | 3,91 |
| 3 | 3,17 | - |
| 4 | 2,99 | - |
| média | 3,11 | 3,53 |
| desv. pad. | 0,12 | 0,53 |
| coef. var. | 3,92% | 14,98% |
| t | -1,34 | Conclusão: como $ t < t_{crit}$, aceito H_0 . Logo, as médias são iguais. |
| w1 | 0,00 | |
| w2 | 0,14 | |
| v | 1,16 | |
| tcrit | 12,71 | |
| Conclusão: como $ t < t_{crit}$, aceito H_0 . Logo, as médias são iguais. | | |

E.3. Cubo

E.3.1. Traço 1

As análises se apresentam na Tabela E - 9 e na Tabela E - 10.

Tabela E - 9 - Análise da influência do tipo de ensaio para determinação do módulo (estático à compressão ou ultrassom), para o cubo de traço T1.

| Comparação/ dados emparelhados/ método de determinação do módulo | | | |
|--|-------------------|---|---------|
| CP real | E ultrassom (GPa) | E inicial compressão (GPa) | d (GPa) |
| 8 | 16,42 | 14,64 | 1,79 |
| 9 | 16,65 | 13,12 | 3,54 |
| 10 | 16,74 | 15,17 | 1,58 |
| 11 | 16,88 | 20,03 | -3,14 |
| 12 | 16,80 | 18,94 | -2,14 |
| 14 | 17,20 | 13,68 | 3,51 |
| 15 | 16,77 | 16,14 | 0,64 |
| 16 | 16,71 | 16,94 | -0,23 |
| 19 | 16,50 | 8,69 | 7,81 |
| 21 | 15,95 | 8,35 | 7,60 |
| média | 16,66 | 14,57 | 2,09 |
| desv. pad. | 0,33 | 3,85 | 3,66 |
| coef. var. | 1,97% | 26,44% | - |
| dmédio | 2,09 | Conclusão: como $ t < t_{crit}$, aceito H_0 . Logo, as médias são iguais. | |
| sd | 3,66 | | |
| n | 10 | | |
| Δ | 0 | | |
| t | 1,81 | | |
| G.L. | 9 | | |
| α | 0,05 | | |
| tcrit. | 2,26 | | |

Tabela E - 10- Análise da influência do tipo de medidor de deformação (extensômetros ou relógios comparadores), para o cubo de traço T1.

| Comparação/ dados emparelhados/ método de medição de deslocamento | | | |
|---|---------------------------|---|---------|
| CP real | Etg50% extensômetro (GPa) | Etg50% relógios comp. (GPa) | d (GPa) |
| 8 | 6,33 | 6,66 | -0,33 |
| 9 | 6,49 | 6,34 | 0,16 |
| 12 | 6,21 | 5,79 | 0,42 |
| 14 | 7,02 | 5,81 | 1,21 |
| 15 | 6,24 | 5,79 | 0,45 |
| 16 | 6,14 | 6,30 | -0,16 |
| média | 6,41 | 6,11 | 0,29 |
| desv. pad. | 0,33 | 0,37 | 0,55 |
| coef. var. | 5,10% | 6,03% | - |
| dmédio | 0,29 | Conclusão: como $ t < t_{crit}$, aceito H_0 . Logo, as médias são iguais. | |
| sd | 0,55 | | |
| n | 6 | | |
| Δ | 0 | | |
| t | 1,31 | | |
| G.L. | 5 | | |
| α | 0,05 | | |
| tcrit. | 2,57 | | |

E.3.2. Traço 2

As comparações estabelecidas estão ilustradas pela Tabela E - 11 e pela Tabela E - 12.

Tabela E - 11 - Análise da influência do tipo de ensaio para determinação do módulo (estático à compressão ou ultrassom), para o cubo de traço T2.

| Comparação/ dados emparelhados/ método de determinação do módulo | | | |
|--|-------------------|---|---------|
| CP real | E ultrassom (GPa) | E inicial compressão (GPa) | d (GPa) |
| 9 | 3,69 | 5,12 | -1,43 |
| 10 | 3,59 | 5,65 | -2,06 |
| 11 | 3,80 | 3,84 | -0,05 |
| 13 | 3,57 | 3,41 | 0,16 |
| 14 | 3,62 | 2,76 | 0,86 |
| 15 | 3,72 | 3,68 | 0,05 |
| 16 | 3,52 | 4,43 | -0,91 |
| média | 3,65 | 4,13 | -0,48 |
| desv. pad. | 0,10 | 1,01 | 1,02 |
| coef. var. | 2,62% | 24,38% | - |
| dmédio | -0,48 | Conclusão: como $ t < t_{crit}$, aceito H_0 . Logo, as médias são iguais. | |
| sd | 1,02 | | |
| n | 7 | | |
| Δ | 0 | | |
| t | -1,25 | | |
| G.L. | 6 | | |
| α | 0,05 | | |
| tcrit. | 2,45 | | |

Tabela E - 12 - Análise da influência do tipo de medidor de deformação (extensômetros ou relógios comparadores), para o cubo de traço T2.

| Comparação/ dados emparelhados/ método de medição de deslocamento | | | |
|---|---------------------------|--|---------|
| CP real | Etg50% extensômetro (GPa) | Etg50% relógios comp. (GPa) | d (GPa) |
| 9 | 1,19 | 0,53 | 0,67 |
| 10 | 0,85 | 0,50 | 0,35 |
| 13 | 0,97 | 0,51 | 0,46 |
| 14 | 1,21 | 0,52 | 0,70 |
| 15 | 1,50 | 0,60 | 0,89 |
| 16 | 0,89 | 0,60 | 0,29 |
| média | 1,10 | 0,54 | 0,56 |
| desv. pad. | 0,25 | 0,05 | 0,23 |
| coef. var. | 22,29% | 8,35% | - |
| dmédio | 0,56 | Conclusão: como $ t > t_{crit}$, rejeito H_0 . Logo, as médias não são iguais. | |
| sd | 0,23 | | |
| n | 6 | | |
| Δ | 0 | | |
| t | 5,92 | | |
| G.L. | 5 | | |
| α | 0,05 | | |
| t _{crit.} | 2,57 | | |

E.4. Placa

E.4.1. Traço 1

A análise está apresentada na Tabela E - 13.

Tabela E - 13 - Análise da influência da direção de medição sobre os resultados de módulo de deformação pelo ultrassom, para a placa de traço T1.

| Comparação/ dados emparelhados/ direção de medição do módulo pelo ultrassom | | | |
|---|---------------|--|---------|
| CP | E long. (GPa) | E esp. (GPa) | d (GPa) |
| 1 | 11,72 | 11,28 | 0,44 |
| 2 | 11,59 | 10,26 | 1,33 |
| 3 | 11,09 | 10,76 | 0,33 |
| 4 | 11,28 | 10,71 | 0,57 |
| 5 | 11,46 | 11,03 | 0,43 |
| 6 | 11,33 | 10,95 | 0,39 |
| 7 | 11,07 | 10,21 | 0,87 |
| 8 | 11,16 | 10,83 | 0,32 |
| média | 11,34 | 10,75 | 0,59 |
| desv. pad. | 0,24 | 0,37 | 0,35 |
| coef. var. | 2,10% | 3,42% | - |
| dmédio | 0,59 | Conclusão: como $ t > t_{crit}$, rejeito H_0 . Logo, as médias não são iguais. | |
| sd | 0,35 | | |
| n | 8 | | |
| Δ | 0,00 | | |
| t | 4,74 | | |
| G.L. | 7 | | |
| α | 0,05 | | |
| t _{crit.} | 2,36 | | |

E.4.2. Traço 2

Na Tabela E - 14, encontra-se a análise realizada para este tipo de corpo-de-prova e traço.

Tabela E - 14 - Análise da influência da direção de medição sobre os resultados de módulo de deformação pelo ultrassom, para a placa de traço T2.

| Comparação/ dados emparelhados/ direção de medição do módulo pelo ultrassom | | | |
|---|------------------|---|---------|
| CP | E long. (GPa) | E esp. (GPa) | d (GPa) |
| 1 | 5,27 | 4,56 | 0,71 |
| 2 | 4,82 | 4,52 | 0,30 |
| 3 | 4,67 | 4,31 | 0,36 |
| 4 | 5,34 | 4,85 | 0,49 |
| 5 | 4,94 | 5,02 | -0,08 |
| 6 | 4,78 | 4,80 | -0,02 |
| 7 | 4,73 | 4,68 | 0,05 |
| 8 | 4,40 | 4,78 | -0,38 |
| média | 4,87 | 4,69 | 0,18 |
| desv. pad. | 0,31 | 0,22 | 0,35 |
| coef. var. | 6,43% | 4,76% | - |
| dmédio | 0,18 | <i>Conclusão: como $t < t_{crit}$, aceito H_0. Logo, as médias são iguais.</i> | |
| sd | 0,35 | | |
| n | 8 | | |
| Δ | 0,00 | | |
| t | 1,45 | | |
| G.L. | 7 | | |
| α | 0,05 | | |
| tcrit. | 2,36 | | |

E.5. Prisma

E.5.1. Traço 1

Os resultados das análises são apresentados da Tabela E - 15 à Tabela E - 18.

Tabela E - 15 - Análise da influência da direção de medição sobre os resultados de módulo de deformação pelo ultrassom, para o prisma de traço T1.

| Comparação/ dados emparelhados/ direção de medição do módulo pelo ultrassom | | | |
|--|--------------------------|--|----------------|
| CP | E long. (GPa) | E esp. (GPa) | d (GPa) |
| 1 | 14,55 | 12,81 | 1,74 |
| 2 | 14,89 | 13,27 | 1,61 |
| 3 | 13,41 | 12,92 | 0,50 |
| 4 | 13,81 | 12,75 | 1,06 |
| 5 | 14,09 | 12,97 | 1,12 |
| 6 | 13,19 | 13,06 | 0,13 |
| 7 | 13,59 | 12,45 | 1,14 |
| 8 | 14,50 | 12,23 | 2,27 |
| 9 | 13,62 | 12,64 | 0,97 |
| 10 | 12,93 | 12,57 | 0,36 |
| 11 | 14,52 | 13,42 | 1,10 |
| 12 | 14,56 | 12,63 | 1,93 |
| 13 | 15,26 | 13,47 | 1,79 |
| 14 | 14,05 | 12,29 | 1,76 |
| 15 | 15,50 | 12,99 | 2,50 |
| 16 | 13,96 | 12,82 | 1,15 |
| 17 | 13,26 | 12,41 | 0,85 |
| 18 | 13,95 | 12,57 | 1,38 |
| 19 | 14,44 | 12,65 | 1,79 |
| 20 | 14,53 | 12,75 | 1,78 |
| 21 | 12,71 | 12,81 | -0,10 |
| média | 14,06 | 12,78 | 1,28 |
| desv. pad. | 0,74 | 0,33 | 0,68 |
| coef. var. | 5,25% | 2,61% | - |
| dmédio | 1,28 | <i>Conclusão: como $t > t_{crit}$, rejeito H_0. Logo, as médias não são iguais.</i> | |
| sd | 0,68 | | |
| n | 21 | | |
| Δ | 0,00 | | |
| t | 8,56 | | |
| G.L. | 20 | | |
| α | 0,05 | | |
| t _{crit.} | 2,09 | | |

Tabela E - 16 - Análise da influência do operador sobre os resultados de módulo de deformação pelo ultrassom, para o prisma de traço T1.

| Comparação/ dados emparelhados/ operadores diferentes (ultrassom) | | | |
|--|-----------------|---|---------|
| CP | E op.1 (GPa) | E op. 2 (GPa) | d (GPa) |
| 1 | 14,55 | 14,19 | 0,36 |
| 2 | 14,89 | 14,67 | 0,22 |
| 3 | 13,41 | 13,75 | -0,33 |
| 4 | 13,81 | 13,86 | -0,05 |
| 5 | 14,09 | 14,19 | -0,10 |
| 6 | 13,19 | 13,33 | -0,14 |
| 7 | 13,59 | 13,98 | -0,39 |
| 8 | 14,50 | 14,24 | 0,26 |
| 9 | 13,62 | 13,38 | 0,24 |
| 10 | 12,93 | 13,11 | -0,18 |
| 11 | 14,52 | 14,20 | 0,31 |
| 12 | 14,56 | 14,77 | -0,21 |
| 13 | 15,26 | 15,09 | 0,17 |
| 14 | 14,05 | 14,31 | -0,25 |
| 15 | 15,50 | 15,67 | -0,18 |
| 16 | 13,96 | 14,47 | -0,51 |
| 17 | 13,26 | 13,08 | 0,18 |
| 18 | 13,95 | 14,35 | -0,40 |
| 19 | 14,44 | 14,87 | -0,42 |
| 20 | 14,53 | 14,17 | 0,36 |
| 21 | 12,71 | 13,62 | -0,91 |
| média | 14,06 | 14,16 | -0,09 |
| desv. pad. | 0,74 | 0,66 | 0,34 |
| coef. var. | 5,25% | 4,64% | - |
| dmédio | -0,09 | <i>Conclusão: como $t < t_{crit}$, aceito H_0. Logo, as médias são iguais.</i> | |
| sd | 0,34 | | |
| n | 21 | | |
| Δ | 0,00 | | |
| t | -1,27 | | |
| G.L. | 20 | | |
| α | 0,05 | | |
| t _{crit.} | 2,09 | | |

Tabela E - 17 - Análise da influência do tipo de ensaio para determinação do módulo (estático à compressão ou ultrassom), para o prisma de traço T1 - análise A.

| Comparação/ dados emparelhados/ método de determinação do módulo/ análise A | | | |
|---|--------------------------|--|---------|
| CP real | E ultrassom - esp. (GPa) | E inicial compressão (GPa) | d (GPa) |
| 12 | 12,81 | 16,74 | -3,93 |
| 13 | 13,27 | 12,92 | 0,36 |
| 14 | 12,92 | 14,97 | -2,05 |
| 15 | 12,75 | 18,69 | -5,94 |
| 16-1 | 12,97 | 11,24 | 1,73 |
| 16-2 | 13,06 | 20,80 | -7,74 |
| 19-1 | 12,45 | 22,97 | -10,52 |
| 19-2 | 12,23 | 22,76 | -10,53 |
| 21-1 | 12,64 | 11,94 | 0,71 |
| 21-2 | 12,57 | 14,67 | -2,10 |
| 20-2 | 12,63 | 15,86 | -3,24 |
| média | 12,75 | 16,69 | -3,93 |
| desv. pad. | 0,29 | 4,14 | 4,30 |
| coef. var. | 2,30% | 24,81% | - |
| dmédio | -3,93 | <i>Conclusão: como $t > t_{crit}$, rejeito H_0. Logo, as médias não são iguais.</i> | |
| sd | 4,30 | | |
| n | 11 | | |
| Δ | 0,00 | | |
| t | -3,03 | | |
| G.L. | 10 | | |
| α | 0,05 | | |
| t _{crit.} | 2,23 | | |

Tabela E - 18 - Análise da influência do tipo de ensaio para determinação do módulo (estático à compressão ou ultrassom), para o prisma de traço T1 - análise B.

| Comparação/ dados emparelhados/ método de determinação do módulo/ análise B | | | |
|---|--------------------------|---|---------|
| CP real | E ultrassom - esp. (GPa) | E inicial compressão (GPa) | d (GPa) |
| 12 | 12,81 | 16,74 | -3,93 |
| 13 | 13,27 | 12,92 | 0,36 |
| 14 | 12,92 | 14,97 | -2,05 |
| 16-1 | 12,97 | 11,24 | 1,73 |
| 21-1 | 12,64 | 11,94 | 0,71 |
| 21-2 | 12,57 | 14,67 | -2,10 |
| 20-2 | 12,63 | 15,86 | -3,24 |
| média | 12,83 | 14,05 | -1,22 |
| desv. pad. | 0,25 | 2,06 | 2,15 |
| coef. var. | 1,92% | 14,64% | - |
| dmédio | -1,22 | <i>Conclusão: como $t < t_{crit}$, aceito H_0. Logo, as médias são iguais.</i> | |
| sd | 2,15 | | |
| n | 7 | | |
| Δ | 0,00 | | |
| t | -1,50 | | |
| G.L. | 6 | | |
| α | 0,05 | | |
| t _{crit.} | 2,45 | | |
| <i>Foram desconsiderados, nesta análise, os CPs de número 15, 16-2, 19-1 e 19-2</i> | | | |

E.5.2. Traço 2

Os resultados se apresentam na Tabela E - 19 e Tabela E - 20.

Tabela E - 19 - Análise da influência da direção de medição sobre os resultados de módulo de deformação pelo ultrassom, para o prisma de traço T2.

| Comparação/ dados emparelhados/ direção de medição do módulo pelo ultrassom | | | |
|---|------------------|--|---------|
| CP | E long. (GPa) | E esp. (GPa) | d (GPa) |
| 1 | 4,90 | 4,62 | 0,27 |
| 2 | 4,78 | 4,73 | 0,05 |
| 3 | 5,07 | 4,81 | 0,26 |
| 4 | 4,99 | 4,96 | 0,03 |
| 5 | 5,22 | 5,28 | -0,07 |
| 6 | 4,98 | 4,83 | 0,14 |
| 7 | 5,20 | 5,19 | 0,01 |
| 8 | 5,12 | 5,20 | -0,08 |
| 9 | 4,84 | 4,74 | 0,10 |
| 10 | 5,36 | 5,02 | 0,34 |
| 11 | 5,29 | 5,01 | 0,28 |
| 12 | 5,27 | 5,34 | -0,08 |
| 13 | 5,04 | 5,09 | -0,05 |
| 14 | 5,11 | 5,07 | 0,04 |
| 15 | 5,17 | 5,40 | -0,23 |
| 16 | 4,49 | 4,50 | -0,01 |
| 17 | 4,45 | 4,40 | 0,05 |
| 18 | 4,68 | 4,89 | -0,21 |
| 19 | 4,89 | 4,61 | 0,28 |
| 20 | 4,88 | 4,83 | 0,06 |
| 21 | 5,14 | 5,11 | 0,03 |
| média | 4,99 | 4,94 | 0,06 |
| desv. pad. | 0,25 | 0,28 | 0,16 |
| coef. var. | 4,98% | 5,60% | - |
| dmédio | 0,06 | Conclusão: como $ t < t_{crit}$, aceito H_0 . Logo, as médias são iguais. | |
| sd | 0,16 | | |
| n | 21 | | |
| Δ | 0,00 | | |
| t | 1,67 | | |
| G.L. | 20 | | |
| α | 0,05 | | |
| tcrit. | 2,09 | | |

Tabela E - 20 - Análise da influência do tipo de ensaio para determinação do módulo (estático à compressão ou ultrassom), para o prisma de traço T2.

| Comparação/ dados emparelhados/ método de determinação do módulo | | | |
|--|--------------------------|---|---------|
| CP real | E ultrassom - esp. (GPa) | E inicial compressão (GPa) | d (GPa) |
| 10 | 4,62 | 5,16 | -0,54 |
| 11 | 4,73 | 4,48 | 0,25 |
| 12 | 4,81 | 5,25 | -0,44 |
| 14-1 | 4,96 | 3,18 | 1,78 |
| 14-2 | 5,28 | 3,96 | 1,33 |
| 15-1 | 4,83 | 4,62 | 0,22 |
| 16-1 | 5,20 | 3,05 | 2,16 |
| 16-2 | 4,74 | 4,76 | -0,02 |
| 18-2 | 5,01 | 4,54 | 0,48 |
| média | 4,91 | 4,33 | 0,58 |
| desv. pad. | 0,22 | 0,79 | 0,96 |
| coef. var. | 0,05 | 0,18 | - |
| dmédio | 0,58 | <i>Conclusão: como $t < t_{crit}$, aceito H_0. Logo, as médias são iguais.</i> | |
| sd | 0,96 | | |
| n | 9 | | |
| Δ | 0,00 | | |
| t | 1,81 | | |
| G.L. | 8 | | |
| α | 0,05 | | |
| t _{crit.} | 2,31 | | |

ANEXO F. Scripts de ensaio

F.1. Cilindro

F.1.1. Resistência à compressão

```
>>>> Programa Tesc - Esboço de Script
>>>> Método COMPRESSAO ARG EN 1015 LEO
>>>> Data: 31/01/07

1  *** Var entrada
2  Velocidade Carga -> "Vel cga", 128.0 N/s, Ent, Res, Rel
3  Carga Limite sup -> "Limite superior", 95000 N
4  Carga Limite inf -> "Limite inferior", 100 N
5  Fatorcalc -> "Fcalc tensao", 1963 mm2
6  Fzero -> "Forca nula", 0 N
7
8  *** Var atribuível
9  Carga ruptura -> "Carga de ruptura", N, Res, Rel
10 Tensao ruptura -> "Tensao de ruptura", MPa, Res, Rel
11 Modulo -> "Mod. Elasticidade", MPa, Res, Rel
12 CR10% -> "10% da Carga de ruptura", N
13 CR50% -> "50% da Carga de ruptura", N
14
15 ***Declaracao de evento
16 @Ruptura -> "", Vis
17 @CR10% -> "", Vis
18 @CR50% -> "", Vis
19 @Nulo -> "", Vis
20
21 ***Retas
22 R elast -> "", Vis
23
24 *** Atribuicao de evento
25 CR10% = AX+B( Carga ruptura; 10.00 %; Fzero )
26 CR50% = AX+B( Carga ruptura; 50.00 %; Fzero )
27 @CR10% = @FORÇA( CR10% )
28 @CR50% = @FORÇA( CR50% )
29 @Ruptura = @FORÇA MAX( )
30 Carga ruptura = FORÇA( @Ruptura )
31 SIS ÁREA = CÓPIA( Fatorcalc )
32 Tensao ruptura = TENSÃO( @Ruptura )
33 R elast = RETA SECANTE( @CR10%; @CR50% )
34 @SIS ORIGEM = @ORIGEM RETA( R elast )
35 Modulo = MÓDULO( R elast )
36
37 *** Comandos
38 SALVAR POSIÇÃO INICIAL( )
39 ATIVAR LIMITE FORÇA( Carga Limite_inf )
40 ATIVAR DET RUPTURA( -2.000 )
41 ATIVAR DET COLAPSO( 0.2000 )
42 DESCER COM VELOC CONST( 15.00 mm/min )
43 AGUARDAR CHEGADA( )
44 EM LIMITE FORÇA( )
45 PARAR SUAVEMENTE( )
46 BIP( 2.000 )
47 AJUSTAR DEFORM( 0.0000 mm )
48 MOV ATÉ A ( Carga_Limite_sup; Velocidade Carga )
49 AGUARDAR CHEGADA( )
50 EM RUPTURA/COLAPSO( )
51 PARAR ABRUPTAMENTE( )
52 BIP( -2.000 )
53 RETORNAR POSIÇÃO INICIAL( 500.0 mm/min )
54 FINALIZAR_ENSAIO( )
```

F.1.2. Módulo de deformação à compressão

```
>>>> Programa Tesc - Esboço de Script
>>>> Método modulo - fernanda - prisma
>>>> Data: 31/01/07

1   *** Variáveis de Entrada
2   CR  -> "Resistência Prevista kN", 0.00 kN, Ent, Res, Edi
3   FZero -> "", 0 N
4   Comp base -> "Comp base", 50 mm, Ent, Edi
5   Área -> "Área", 1963.0 mm2, Ent, Res, Edi
6
7   >>> Mensagens
8   M1 -> Retirar o extensômetro e após pressiona...
9
10
11  ***Variáveis Atribuíveis
12  CR10 x% -> "10% da carga de ruptura", N
13  CR20x% -> "20% da carga de ruptura", N
14  CR30x% -> "30% da carga de ruptura", N
15  CR40x% -> "40% da carga de ruptura", N
16  CR50x% -> "50% da carga de ruptura", N
17  CR60x% -> "60% da carga de ruptura", N
18  CR70x% -> "70% da carga de ruptura", N
19  CR80x% -> "80% da carga de ruptura", N
20  Def Marca0 -> "L0%", mm, Res
21  Def Marca1 -> "L10%", mm, Res, Rel
22  Def Marca2 -> "L20%", mm, Res, Rel
23  Def Marca3 -> "L30%", mm, Res, Rel
24  Def Marca4 -> "L40%", mm, Res, Rel
25  Def Marca 5 -> "L50%", mm, Res, Rel
26  Def Marca6 -> "L60%", mm, Res, Rel
27  Def Marca7 -> "L70%", mm, Res, Rel
28  Def Marca8 -> "L80%", mm, Res, Rel
29  Mod Elast -> "Módulo tang ini", MPa, Res, Rel
30  F máx -> "Força Máxima", kN, Res
31  Tensão -> "Tensão ruptura", MPa, Res
32
33  *** Retas
34  R elást -> "", Vis
35
36
37  *** Declaração dos eventos
38  @L0% -> ""
39  @L10% -> ""
40  @L20% -> ""
41  @L30% -> ""
42  @L40% -> ""
43  @L50% -> ""
44  @L60% -> ""
45  @L70% -> ""
46  @L80% -> ""
47  @Nulo -> ""
48  @FMáx -> ""
49  @CR10% -> ""
50  @CR20% -> ""
51  @CR30% -> ""
52  @CR40% -> ""
53  @CR50% -> ""
54  @CR60% -> ""
55  @CR70% -> ""
56  @CR80% -> ""
57
58  *** Atribuições aos eventos
59  @L0% = @MARCA( 0.0000 )
60  @L10% = @MARCA( 1.000 )
61  @L20% = @MARCA( 2.000 )
62  @L30% = @MARCA( 3.000 )
63  @L40% = @MARCA( 4.000 )
64  @L50% = @MARCA( 5.000 )
65  @L60% = @MARCA( 6.000 )
66  @L70% = @MARCA( 7.000 )
67  @L80% = @MARCA( 8.000 )
68  CR10 x% = AX+B( CR; 10.00 %; FZero )
69  CR20x% = AX+B( CR; 20.00 %; FZero )
70  CR30x% = AX+B( CR; 30.00 %; FZero )
71  CR40x% = AX+B( CR; 40.00 %; FZero )
72  CR50x% = AX+B( CR; 50.00 %; FZero )
```

```

73 CR60x% = AX+B( CR; 60.00 %; FZero )
74 CR70x% = AX+B( CR; 70.00 %; FZero )
75 CR80x% = AX+B( CR; 80.00 %; FZero )
76 @CR10% = @FORÇA( CR10 x% )
77 @CR20% = @FORÇA( CR20x% )
78 @CR30% = @FORÇA( CR30x% )
79 @CR40% = @FORÇA( CR40x% )
80 @CR50% = @FORÇA( CR50x% )
81 @CR60% = @FORÇA( CR60x% )
82 @CR70% = @FORÇA( CR70x% )
83 @CR80% = @FORÇA( CR80x% )
84 Def Marca0 = DEFORM( @L0% )
85 Def Marca1 = DEFORM( @L10% )
86 Def Marca2 = DEFORM( @L20% )
87 Def Marca3 = DEFORM( @L30% )
88 Def Marca4 = DEFORM( @L40% )
89 Def Marca 5 = DEFORM( @L50% )
90 Def Marca6 = DEFORM( @L60% )
91 Def Marca7 = DEFORM( @L70% )
92 Def Marca8 = DEFORM( @L80% )
93 SIS COMPR BASE = CÓPIA( Comp base )
94 SIS ÁREA = CÓPIA( Área )
95 R elást = RETA INICIAL( @Nulo; @Nulo )
96 @SIS ORIGEM = @ORIGEM RETA( R elást )
97 @FMáx = @FORÇA MAX( )
98 F máx = FORÇA( @FMáx )
99 Mod Elast = MÓDULO( R elást )
100 Tensão = TENSÃO( @FMáx )
101
102
103 *** Comandos
104 SALVAR POSIÇÃO INICIAL( )
105 ATIVAR LIMITE FORÇA( 10.00 N )
106 DESCER COM VELOC CONST( 15.00 mm/min )
107 AGUARDAR CHEGADA( )
108 EM LIMITE FORÇA( )
109 BIP( -2.000 )
110
111 >>> Primeiro Ciclo
112 MOV ATÉ A ( CR30x%; 128.0 N/s )
113 AGUARDAR CHEGADA( )
114 AGUARDAR( 30.00 s )
115 MOV ATÉ A ( CR10 x%; 128.0 N/s )
116 AGUARDAR CHEGADA( )
117 AGUARDAR( 30.00 s )
118
119 >>> Segundo Ciclo
120 MOV ATÉ A ( CR30x%; 128.0 N/s )
121 AGUARDAR CHEGADA( )
122 AGUARDAR( 30.00 s )
123 MOV ATÉ A ( CR10 x%; 128.0 N/s )
124 AGUARDAR CHEGADA( )
125 AGUARDAR( 30.00 s )
126
127 >>> Terceiro Ciclo
128 MOV ATÉ A ( CR30x%; 128.0 N/s )
129 AGUARDAR CHEGADA( )
130 AGUARDAR( 30.00 s )
131 MOV ATÉ A ( 100.0 N; 128.0 N/s )
132 AGUARDAR CHEGADA( )
133 AGUARDAR( 30.00 s )
134 MARCAR( 0.0000 )
135
136 >>> Inicio do carregamento
137 BIP( 2.000 )
138 MOV ATÉ A ( CR10 x%; 128.0 N/s )
139 AGUARDAR CHEGADA( )
140 MARCAR( 1.000 )
141 MOV ATÉ A ( CR20x%; 128.0 N/s )
142 AGUARDAR CHEGADA( )
143 MARCAR( 2.000 )
144 MOV ATÉ A ( CR30x%; 128.0 N/s )
145 AGUARDAR CHEGADA( )
146 MARCAR( 3.000 )
147 MOV ATÉ A ( CR40x%; 128.0 N/s )
148 AGUARDAR_CHEGADA( )

```

```

149 MARCAR( 4.000 )
150 MOV ATÉ A ( CR50x%; 128.0 N/s )
151 AGUARDAR CHEGADA( )
152 MARCAR( 5.000 )
153 MOV ATÉ A ( CR60x%; 128.0 N/s )
154 AGUARDAR CHEGADA( )
155 MARCAR( 6.000 )
156 MOV ATÉ A ( CR70x%; 128.0 N/s )
157 AGUARDAR CHEGADA( )
158 MARCAR( 7.000 )
159 AGUARDAR( 1.000 s )
160 MOV ATÉ A ( CR80x%; 128.0 N/s )
161 AGUARDAR CHEGADA( )
162 MARCAR( 8.000 )
163 AGUARDAR( 1.000 s )
164 BIP( 1.000 )
165 INTERROMPER AQUISIÇÃO( )
166 CONGELAR DEFORM( -1.000 mm )
167 DISPARAR MENSAGEM( M1; 0.0000 s )
168 BIP( 1.000 )
169 AGUARDAR( 9999 s )
170 EM TECLA F( 1.000 )
171 ATIVAR DET COLAPSO( 10.00 % )
172 RETOMAR AQUISIÇÃO( )
173 MOV ATÉ A ( 9700 kgf; 128.0 N/s )
174 AGUARDAR_CHEGADA( )
175
176 *** Finalização
177 EM RUPTURA/COLAPSO( )
178 BIP( 2.000 )
179 PARAR SUAVEMENTE( )
180 RETORNAR POSIÇÃO INICIAL( 5.000 mm/min )
181 FINALIZAR_ENSAIO( )

```

F.2. Cubo

F.2.1. Resistência à compressão (traço T2)

```
>>>> Programa Testc - Esboço de Script
>>>> Método COMPRESSAO ARG EN 1015 LEO
>>>> Data: 31/01/07

1  *** Var entrada
2  Velocidade Carga -> "Vel cga", 650.0 N/s, Ent, Res, Rel
3  Carga Limite sup -> "Limite superior", 95000 N
4  Carga Limite inf -> "Limite inferior", 100 N
5  Fatorcalc -> "Fcalc tensao", 10000 mm2
6  Fzero -> "Forca nula", 0 N
7
8  *** Var atribuível
9  Carga ruptura -> "Carga de ruptura", N, Res, Rel
10 Tensao ruptura -> "Tensao de ruptura", MPa, Res, Rel
11 Modulo -> "Mod. Elasticidade", MPa, Res, Rel
12 CR10% -> "10% da Carga de ruptura", N
13 CR50% -> "50% da Carga de ruptura", N
14
15 ***Declaracao de evento
16 @Ruptura -> "", Vis
17 @CR10% -> "", Vis
18 @CR50% -> "", Vis
19 @Nulo -> "", Vis
20
21 ***Retas
22 R elast -> "", Vis
23
24 *** Atribuicao de evento
25 CR10% = AX+B( Carga ruptura; 10.00 %; Fzero )
26 CR50% = AX+B( Carga ruptura; 50.00 %; Fzero )
27 @CR10% = @FORÇA( CR10% )
28 @CR50% = @FORÇA( CR50% )
29 @Ruptura = @FORÇA MAX( )
30 Carga ruptura = FORÇA( @Ruptura )
31 SIS ÁREA = CÓPIA( Fatorcalc )
32 Tensao ruptura = TENSÃO( @Ruptura )
33 R elast = RETA SECANTE( @CR10%; @CR50% )
34 @SIS ORIGEM = @ORIGEM RETA( R elast )
35 Modulo = MÓDULO( R elast )
36
37 *** Comandos
38 SALVAR POSIÇÃO INICIAL( )
39 ATIVAR LIMITE FORÇA( Carga Limite_inf )
40 ATIVAR DET RUPTURA( -2.000 )
41 ATIVAR DET COLAPSO( 0.2000 )
42 DESCER COM VELOC CONST( 15.00 mm/min )
43 AGUARDAR CHEGADA( )
44 EM LIMITE FORÇA( )
45 PARAR SUAVEMENTE( )
46 BIP( 2.000 )
47 AJUSTAR DEFORM( 0.0000 mm )
48 MOV ATÉ A ( Carga_Limite_sup; Velocidade Carga )
49 AGUARDAR CHEGADA( )
50 EM RUPTURA/COLAPSO( )
51 PARAR ABRUPTAMENTE( )
52 BIP( -2.000 )
53 RETORNAR POSIÇÃO INICIAL( 500.0 mm/min )
54 FINALIZAR_ENSAIO( )
```

F.2.2. Módulo de deformação à compressão (traço T2)

```
>>>> Programa Tesc - Esboço de Script
>>>> Método USP Compressão Módulo
>>>> Data: 31/01/07

1   *** Variáveis de Entrada
2   CR -> "Resistência Prevista", 0.00 kN, Ent, Res, Edi
3   FZero -> "", 0 N
4   Comp base -> "Comp base", 50 mm, Ent, Edi
5   Área -> "Área", 10000.0 mm2, Ent, Res, Edi
6
7   >>> Mensagens
8   M1 -> Retirar o extensômetro e após pressiona...
9
10
11  ***Variáveis Atribuíveis
12  CR10 x% -> "10% da carga de ruptura", N
13  CR20x% -> "20% da carga de ruptura", N
14  CR30x% -> "30% da carga de ruptura", N
15  CR40x% -> "40% da carga de ruptura", N
16  CR50x% -> "50% da carga de ruptura", N
17  CR60x% -> "60% da carga de ruptura", N
18  CR70x% -> "70% da carga de ruptura", N
19  CR80x% -> "80% da carga de ruptura", N
20  Def Marca0 -> "L0%", mm, Res
21  Def Marca1 -> "L10%", mm, Res, Rel
22  Def Marca2 -> "L20%", mm, Res, Rel
23  Def Marca3 -> "L30%", mm, Res, Rel
24  Def Marca4 -> "L40%", mm, Res, Rel
25  Def Marca5 -> "L50%", mm, Res, Rel
26  Def Marca6 -> "L60%", mm, Res, Rel
27  Def Marca7 -> "L70%", mm, Res, Rel
28  Def Marca8 -> "L80%", mm, Res, Rel
29  Mod Elast -> "Módulo tanq ini", MPa, Res, Rel
30  F máx -> "Força Máxima", kN, Res
31  Tensão -> "Tensão ruptura", MPa, Res
32
33  *** Retas
34  R elást -> "", Vis
35
36
37  *** Declaração dos eventos
38  @L0% -> ""
39  @L10% -> ""
40  @L20% -> ""
41  @L30% -> ""
42  @L40% -> ""
43  @L50% -> ""
44  @L60% -> ""
45  @L70% -> ""
46  @L80% -> ""
47  @Nulo -> ""
48  @FMáx -> ""
49  @CR10% -> ""
50  @CR20% -> ""
51  @CR30% -> ""
52  @CR40% -> ""
53  @CR50% -> ""
54  @CR60% -> ""
55  @CR70% -> ""
56  @CR80% -> ""
57
58  *** Atribuições aos eventos
59  @L0% = @MARCA( 0.0000 )
60  @L10% = @MARCA( 1.000 )
61  @L20% = @MARCA( 2.000 )
62  @L30% = @MARCA( 3.000 )
63  @L40% = @MARCA( 4.000 )
64  @L50% = @MARCA( 5.000 )
65  @L60% = @MARCA( 6.000 )
66  @L70% = @MARCA( 7.000 )
67  @L80% = @MARCA( 8.000 )
68  CR10 x% = AX+B( CR; 10.00 %; FZero )
69  CR20x% = AX+B( CR; 20.00 %; FZero )
70  CR30x% = AX+B( CR; 30.00 %; FZero )
71  CR40x% = AX+B( CR; 40.00 %; FZero )
72  CR50x% = AX+B( CR; 50.00 %; FZero )
```

```

73 CR60x% = AX+B( CR; 60.00 %; FZero )
74 CR70x% = AX+B( CR; 70.00 %; FZero )
75 CR80x% = AX+B( CR; 80.00 %; FZero )
76 @CR10% = @FORÇA( CR10 x% )
77 @CR20% = @FORÇA( CR20x% )
78 @CR30% = @FORÇA( CR30x% )
79 @CR40% = @FORÇA( CR40x% )
80 @CR50% = @FORÇA( CR50x% )
81 @CR60% = @FORÇA( CR60x% )
82 @CR70% = @FORÇA( CR70x% )
83 @CR80% = @FORÇA( CR80x% )
84 Def Marca0 = DEFORM( @L0% )
85 Def Marca1 = DEFORM( @L10% )
86 Def Marca2 = DEFORM( @L20% )
87 Def Marca3 = DEFORM( @L30% )
88 Def Marca4 = DEFORM( @L40% )
89 Def Marca 5 = DEFORM( @L50% )
90 Def Marca6 = DEFORM( @L60% )
91 Def Marca7 = DEFORM( @L70% )
92 Def Marca8 = DEFORM( @L80% )
93 SIS COMPR BASE = CÓPIA( Comp base )
94 SIS ÁREA = CÓPIA( Área )
95 R elást = RETA INICIAL( @Nulo; @Nulo )
96 @SIS ORIGEM = @ORIGEM RETA( R elást )
97 @FMáx = @FORÇA MAX( )
98 F máx = FORÇA( @FMáx )
99 Mod Elast = MÓDULO( R elást )
100 Tensão = TENSÃO( @FMáx )
101
102
103 *** Comandos
104 SALVAR POSIÇÃO INICIAL( )
105 ATIVAR LIMITE FORÇA( 10.00 N )
106 DESCER COM VELOC CONST( 15.00 mm/min )
107 AGUARDAR CHEGADA( )
108 EM LIMITE FORÇA( )
109 BIP( -2.000 )
110
111 >>> Primeiro Ciclo
112 MOV ATÉ A ( CR30x%; 650.0 N/s )
113 AGUARDAR CHEGADA( )
114 AGUARDAR( 30.00 s )
115 MOV ATÉ A ( CR10 x%; 650.0 N/s )
116 AGUARDAR CHEGADA( )
117 AGUARDAR( 30.00 s )
118
119 >>> Segundo Ciclo
120 MOV ATÉ A ( CR30x%; 650.0 N/s )
121 AGUARDAR CHEGADA( )
122 AGUARDAR( 30.00 s )
123 MOV ATÉ A ( CR10 x%; 650.0 N/s )
124 AGUARDAR CHEGADA( )
125 AGUARDAR( 30.00 s )
126
127 >>> Terceiro Ciclo
128 MOV ATÉ A ( CR30x%; 650.0 N/s )
129 AGUARDAR CHEGADA( )
130 AGUARDAR( 30.00 s )
131 MOV ATÉ A ( 100.0 N; 650.0 N/s )
132 AGUARDAR CHEGADA( )
133 AGUARDAR( 30.00 s )
134 MARCAR( 0.0000 )
135 AGUARDAR( 2.000 s )
136
137 >>> Inicio do carregamento
138 BIP( 2.000 )
139 MOV ATÉ A ( CR10 x%; 650.0 N/s )
140 AGUARDAR CHEGADA( )
141 BIP( 1.000 )
142 AGUARDAR( 5.000 s )
143 MARCAR( 1.000 )
144 MOV ATÉ A ( CR20x%; 650.0 N/s )
145 AGUARDAR CHEGADA( )
146 BIP( 1.000 )
147 AGUARDAR( 5.000 s )
148 MARCAR( 2.000 )

```

```

149 MOV ATÉ      A      ( CR30x%; 650.0 N/s )
150 AGUARDAR CHEGADA( )
151 BIP( 1.000 )
152 AGUARDAR( 5.000 s )
153 MARCAR( 3.000 )
154 MOV ATÉ      A      ( CR40x%; 650.0 N/s )
155 AGUARDAR CHEGADA( )
156 BIP( 1.000 )
157 AGUARDAR( 5.000 s )
158 MARCAR( 4.000 )
159 MOV ATÉ      A      ( CR50x%; 650.0 N/s )
160 AGUARDAR CHEGADA( )
161 BIP( 1.000 )
162 AGUARDAR( 5.000 s )
163 MARCAR( 5.000 )
164 MOV ATÉ      A      ( CR60x%; 650.0 N/s )
165 AGUARDAR CHEGADA( )
166 BIP( 1.000 )
167 AGUARDAR( 5.000 s )
168 MARCAR( 6.000 )
169 MOV ATÉ      A      ( CR70x%; 650.0 N/s )
170 AGUARDAR CHEGADA( )
171 BIP( 1.000 )
172 AGUARDAR( 5.000 s )
173 MARCAR( 7.000 )
174 AGUARDAR( 5.000 s )
175 MOV ATÉ      A      ( CR80x%; 650.0 N/s )
176 AGUARDAR CHEGADA( )
177 AGUARDAR( 5.000 s )
178 MARCAR( 8.000 )
179 AGUARDAR( 5.000 s )
180 BIP( 1.000 )
181 INTERROMPER AQUISIÇÃO( )
182 CONGELAR DEFORM( -1.000 mm )
183 DISPARAR MENSAGEM( M1; 0.0000 s )
184 BIP( 1.000 )
185 AGUARDAR( 9999 s )
186 EM TECLA F( 1.000 )
187 ATIVAR DET COLAPSO( 10.00 % )
188 RETOMAR AQUISIÇÃO( )
189 MOV ATÉ      A      ( 9700 kgf; 650.0 N/s )
190 AGUARDAR_CHEGADA( )
191
192 *** Finalização
193 EM RUPTURA/COLAPSO( )
194 BIP( 2.000 )
195 PARAR SUAVEMENTE( )
196 RETORNAR POSIÇÃO INICIAL( 5.000 mm/min )
197 FINALIZAR_ENSAIO( )

```

Para o traço T1, a única mudança em relação ao “*script*” de ensaio de módulo de deformação à compressão é a exclusão de todas as linhas e variáveis relacionadas à determinação do deslocamento em 70% e 80% da carga de ruptura.

F.3. Prisma

F.3.1. Resistência à compressão

```
>>>>> Programa Tesc - Esboço de Script
>>>>> Método COMPRESSAO ARG EN 1015 LEO
>>>>> Data: 31/01/07

1   *** Var entrada
2   Velocidade Carga -> "Vel cga", 100.0 N/s, Ent, Res, Rel
3   Carga Limite sup -> "Limite superior", 95000 N
4   Carga Limite inf -> "Limite inferior", 100 N
5   Fatorcalc -> "Fcalc tensao", 1600 mm2
6   Fzero -> "Forca nula", 0 N
7
8   *** Var atribuível
9   Carga ruptura -> "Carga de ruptura", N, Res, Rel
10  Tensao ruptura -> "Tensao de ruptura", MPa, Res, Rel
11  Modulo -> "Mod. Elasticidade", MPa, Res, Rel
12  CR10% -> "10% da Carga de ruptura", N
13  CR50% -> "50% da Carga de ruptura", N
14
15  ***Declaracao de evento
16  @Ruptura -> "", Vis
17  @CR10% -> "", Vis
18  @CR50% -> "", Vis
19  @Nulo -> "", Vis
20
21  ***Retas
22  R elast -> "", Vis
23
24  *** Atribuicao de evento
25  CR10% = AX+B( Carga ruptura; 10.00 %; Fzero )
26  CR50% = AX+B( Carga ruptura; 50.00 %; Fzero )
27  @CR10% = @FORÇA( CR10% )
28  @CR50% = @FORÇA( CR50% )
29  @Ruptura = @FORÇA MAX( )
30  Carga ruptura = FORÇA( @Ruptura )
31  SIS ÁREA = CÓPIA( Fatorcalc )
32  Tensao ruptura = TENSÃO( @Ruptura )
33  R elast = RETA SECANTE( @CR10%; @CR50% )
34  @SIS ORIGEM = @ORIGEM RETA( R elast )
35  Modulo = MÓDULO( R elast )
36
37  *** Comandos
38  SALVAR POSIÇÃO INICIAL( )
39  ATIVAR LIMITE FORÇA( Carga Limite_inf )
40  ATIVAR DET RUPTURA( -2.000 )
41  ATIVAR DET COLAPSO( 0.2000 )
42  DESCER COM VELOC CONST( 15.00 mm/min )
43  AGUARDAR CHEGADA( )
44  EM LIMITE FORÇA( )
45  PARAR SUAVEMENTE( )
46  BIP( 2.000 )
47  AJUSTAR DEFORM( 0.0000 mm )
48  MOV ATÉ A ( Carga_Limite_sup; Velocidade Carga )
49  AGUARDAR CHEGADA( )
50  EM RUPTURA/COLAPSO( )
51  PARAR ABRUPTAMENTE( )
52  BIP( -2.000 )
53  RETORNAR POSIÇÃO INICIAL( 500.0 mm/min )
54  FINALIZAR_ENSAIO( )
```

F.3.2. Resistência à tração na flexão

```
>>>> Programa Tesc - Esboço de Script
>>>> Método FLEXAO ARG EN 1015-CEL 10000 LEO
>>>> Data: 31/01/07

1  *** Var entrada
2  Velocidade Carga -> "Vel cga", 13.0 N/s, Ent, Res, Rel
3  Carga Limite sup -> "Limite superior", 10000 N, Ent, Res, Rel
4  Carga Limite inf -> "Limite inferior", 100 N, Ent, Res, Rel
5  Fatorcalc -> "Fcalc tensao", 427 mm2, Ent, Res, Rel
6
7  *** Var atribuível
8  Carga ruptura -> "Carga de ruptura", N, Res, Rel
9  Tensao_ruptura -> "Tensao de ruptura", MPa, Res, Rel
10
11 ***Declaracao de evento
12 @Ruptura -> "", Vis
13
14 *** Atribuicao de evento
15 @Ruptura = @FORÇA MAX( )
16 Carga ruptura = FORÇA( @Ruptura )
17 SIS ÁREA = CÓPIA( Fatorcalc )
18 Tensao_ruptura = TENSÃO( @Ruptura )
19
20 *** Comandos
21 SALVAR POSIÇÃO INICIAL( )
22 ATIVAR LIMITE FORÇA( Carga Limite_inf )
23 ATIVAR DET RUPTURA( 0.0000 )
24 ATIVAR DET COLAPSO( 0.7000 )
25 DESCER COM VELOC CONST( 15.00 mm/min )
26 AGUARDAR CHEGADA( )
27 EM LIMITE FORÇA( )
28 PARAR SUAVEMENTE( )
29 BIP( 2.000 )
30 AJUSTAR DEFORM( 0.0000 mm )
31 MOV ATÉ A ( Carga_Limite_sup; Velocidade Carga )
32 AGUARDAR CHEGADA( )
33 EM RUPTURA/COLAPSO( )
34 PARAR ABRUPTAMENTE( )
35 BIP( -2.000 )
36 RETORNAR POSIÇÃO INICIAL( 500.0 mm/min )
37 FINALIZAR_ENSAIO( )
```

F.3.3. Módulo de deformação à compressão

```
>>>> Programa Tesc - Esboço de Script
>>>> Método modulo - fernanda - prisma
>>>> Data: 31/01/07

1  *** Variáveis de Entrada
2  CR -> "Resistência Prevista kN", 0.00 kN, Ent, Res, Edi
3  FZero -> "", 0 N
4  Comp base -> "Comp base", 20 mm, Ent, Edi
5  Área -> "Área", 1600.0 mm2, Ent, Res, Edi
6
7  >>> Mensagens
8  M1 -> Retirar o extensômetro e após pressiona...
9
10
11 ***Variáveis Atribuíveis
12 CR10x% -> "10% da carga de ruptura", N
13 CR20x% -> "20% da carga de ruptura", N
14 CR30x% -> "30% da carga de ruptura", N
15 CR40x% -> "40% da carga de ruptura", N
16 CR50x% -> "50% da carga de ruptura", N
17 CR60x% -> "60% da carga de ruptura", N
18 CR70x% -> "70% da carga de ruptura", N
19 CR80x% -> "80% da carga de ruptura", N
20 Def Marca0 -> "L0%", mm, Res
21 Def Marca1 -> "L10%", mm, Res, Rel
22 Def Marca2 -> "L20%", mm, Res, Rel
23 Def Marca3 -> "L30%", mm, Res, Rel
24 Def Marca4 -> "L40%", mm, Res, Rel
25 Def Marca 5 -> "L50%", mm, Res, Rel
26 Def Marca6 -> "L60%", mm, Res, Rel
27 Def Marca7 -> "L70%", mm, Res, Rel
28 Def Marca8 -> "L80%", mm, Res, Rel
29 Mod Elast -> "Módulo tang ini", MPa, Res, Rel
30 F máx -> "Força Máxima", kN, Res
31 Tensão -> "Tensão ruptura", MPa, Res
32
33 *** Retas
34 R elást -> "", Vis
35
36
37 *** Declaração dos eventos
38 @L0% -> ""
39 @L10% -> ""
40 @L20% -> ""
41 @L30% -> ""
42 @L40% -> ""
43 @L50% -> ""
44 @L60% -> ""
45 @L70% -> ""
46 @L80% -> ""
47 @Nulo -> ""
48 @FMáx -> ""
49 @CR10% -> ""
50 @CR20% -> ""
51 @CR30% -> ""
52 @CR40% -> ""
53 @CR50% -> ""
54 @CR60% -> ""
55 @CR70% -> ""
56 @CR80% -> ""
57
58 *** Atribuições aos eventos
59 @L0% = @MARCA( 0.0000 )
60 @L10% = @MARCA( 1.000 )
61 @L20% = @MARCA( 2.000 )
62 @L30% = @MARCA( 3.000 )
63 @L40% = @MARCA( 4.000 )
64 @L50% = @MARCA( 5.000 )
65 @L60% = @MARCA( 6.000 )
66 @L70% = @MARCA( 7.000 )
67 @L80% = @MARCA( 8.000 )
68 CR10 x% = AX+B( CR; 10.00 %; FZero )
69 CR20x% = AX+B( CR; 20.00 %; FZero )
70 CR30x% = AX+B( CR; 30.00 %; FZero )
71 CR40x% = AX+B( CR; 40.00 %; FZero )
72 CR50x% = AX+B( CR; 50.00 %; FZero )
```

```

73 CR60x% = AX+B( CR; 60.00 %; FZero )
74 CR70x% = AX+B( CR; 70.00 %; FZero )
75 CR80x% = AX+B( CR; 80.00 %; FZero )
76 @CR10% = @FORÇA( CR10 x% )
77 @CR20% = @FORÇA( CR20x% )
78 @CR30% = @FORÇA( CR30x% )
79 @CR40% = @FORÇA( CR40x% )
80 @CR50% = @FORÇA( CR50x% )
81 @CR60% = @FORÇA( CR60x% )
82 @CR70% = @FORÇA( CR70x% )
83 @CR80% = @FORÇA( CR80x% )
84 Def Marca0 = DEFORM( @L0% )
85 Def Marca1 = DEFORM( @L10% )
86 Def Marca2 = DEFORM( @L20% )
87 Def Marca3 = DEFORM( @L30% )
88 Def Marca4 = DEFORM( @L40% )
89 Def Marca5 = DEFORM( @L50% )
90 Def Marca6 = DEFORM( @L60% )
91 Def Marca7 = DEFORM( @L70% )
92 Def Marca8 = DEFORM( @L80% )
93 SIS COMPR BASE = CÓPIA( Comp base )
94 SIS ÁREA = CÓPIA( Área )
95 R elást = RETA INICIAL( @Nulo; @Nulo )
96 @SIS ORIGEM = @ORIGEM RETA( R elást )
97 @FMáx = @FORÇA MAX( )
98 F máx = FORÇA( @FMáx )
99 Mod Elast = MÓDULO( R elást )
100 Tensão = TENSÃO( @FMáx )
101
102
103 *** Comandos
104 SALVAR POSIÇÃO INICIAL( )
105 ATIVAR LIMITE FORÇA( 10.00 N )
106 DESCER COM VELOC CONST( 15.00 mm/min )
107 AGUARDAR CHEGADA( )
108 EM LIMITE FORÇA( )
109 BIP( -2.000 )
110
111 >>> Primeiro Ciclo
112 MOV ATÉ A ( CR30x%; 100.0 N/s )
113 AGUARDAR CHEGADA( )
114 AGUARDAR( 30.00 s )
115 MOV ATÉ A ( CR10 x%; 100.0 N/s )
116 AGUARDAR CHEGADA( )
117 AGUARDAR( 30.00 s )
118
119 >>> Segundo Ciclo
120 MOV ATÉ A ( CR30x%; 100.0 N/s )
121 AGUARDAR CHEGADA( )
122 AGUARDAR( 30.00 s )
123 MOV ATÉ A ( CR10 x%; 100.0 N/s )
124 AGUARDAR CHEGADA( )
125 AGUARDAR( 30.00 s )
126
127 >>> Terceiro Ciclo
128 MOV ATÉ A ( CR30x%; 100.0 N/s )
129 AGUARDAR CHEGADA( )
130 AGUARDAR( 30.00 s )
131 MOV ATÉ A ( 100.0 N; 100.0 N/s )
132 AGUARDAR CHEGADA( )
133 AGUARDAR( 30.00 s )
134 MARCAR( 0.0000 )
135
136 >>> Inicio do carregamento
137 BIP( 2.000 )
138 MOV ATÉ A ( CR10 x%; 100.0 N/s )
139 AGUARDAR CHEGADA( )
140 MARCAR( 1.000 )
141 MOV ATÉ A ( CR20x%; 100.0 N/s )
142 AGUARDAR CHEGADA( )
143 MARCAR( 2.000 )
144 MOV ATÉ A ( CR30x%; 100.0 N/s )
145 AGUARDAR CHEGADA( )
146 MARCAR( 3.000 )
147 MOV ATÉ A ( CR40x%; 100.0 N/s )
148 AGUARDAR_CHEGADA( )

```

```

149 MARCAR( 4.000 )
150 MOV ATÉ A ( CR50x8; 100.0 N/s )
151 AGUARDAR CHEGADA( )
152 MARCAR( 5.000 )
153 MOV ATÉ A ( CR60x8; 100.0 N/s )
154 AGUARDAR CHEGADA( )
155 MARCAR( 6.000 )
156 MOV ATÉ A ( CR70x8; 100.0 N/s )
157 AGUARDAR CHEGADA( )
158 MARCAR( 7.000 )
159 AGUARDAR( 1.000 s )
160 MOV ATÉ A ( CR80x8; 100.0 N/s )
161 AGUARDAR CHEGADA( )
162 MARCAR( 8.000 )
163 AGUARDAR( 1.000 s )
164 BIP( 1.000 )
165 INTERROMPER AQUISIÇÃO( )
166 CONGELAR DEFORM( -1.000 mm )
167 DISPARAR MENSAGEM( M1; 0.0000 s )
168 BIP( 1.000 )
169 AGUARDAR( 9999 s )
170 EM TECLA F( 1.000 )
171 ATIVAR DET COLAPSO( 10.00 % )
172 RETOMAR AQUISIÇÃO( )
173 MOV ATÉ A ( 9700 kgf; 100.0 N/s )
174 AGUARDAR_CHEGADA( )
175
176 *** Finalização
177 EM RUPTURA/COLAPSO( )
178 BIP( 2.000 )
179 PARAR SUAVEMENTE( )
180 RETORNAR POSIÇÃO INICIAL( 5.000 mm/min )
181 FINALIZAR_ENSAIO( )

```

ANEXO G. Resumo e artigo enviados ao IBRACON

G.1. Resumo

AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS: ENSAIOS ESTÁTICOS OU DINÂMICOS?

SILVA, F.; MONTE, R.; BARROS, M. M. S. B.

¹ Aluna de iniciação científica. Escola Politécnica da USP. E-mail: fernanda.belizario@gmail.com

² Mestre Eng. Civil, Especialista de Laboratório. Escola Politécnica da USP. E-mail: renata.monte@poli.usp.br

³ Prof^a Doutora da Escola Politécnica da USP. E-mail: mercia.barros@poli.usp.br

O módulo de deformação, que reflete a capacidade de deformação de um determinado material, é um dado essencial para que se possa avaliar a sua aplicabilidade. No caso específico de materiais cimentícios, esta propriedade expressa sua capacidade de se deformar sem que ocorra ruptura na forma de fissuras visíveis que possam vir a prejudicar o desempenho de componentes com eles produzidos.

Para se avaliar esta propriedade, há vários métodos de ensaio, que se distinguem em dois grandes grupos: os ensaios estáticos e os ensaios dinâmicos. No meio técnico, porém, não há um consenso sobre qual método se deve utilizar para a avaliação desta propriedade em argamassas de base cimentícia. Em função disto, há uma grande dificuldade de se avaliar as características de uma argamassa, pois não se sabe qual valor se deve tomar como referência.

Ao se avaliar este cenário, surgem alguns questionamentos: qual método deve ser adotado? Há alguma relação entre os resultados obtidos por métodos diversos? Qual seria a confiabilidade de cada método?

O objetivo do presente trabalho é contribuir para que estes questionamentos sejam esclarecidos. Para isto, foram avaliadas duas argamassas distintas, uma considerada forte e outra fraca. Para cada traço foram moldados corpos de prova cilíndricos ($\phi 5 \times 10 \text{cm}$), tendo-se avaliado a sua resistência à compressão, (NBR7215, 1996) e o seu módulo de deformação, tanto o estático - à compressão (adaptação da NBR8522,2003) como o dinâmico - pelo ultrassom (adaptação da BS EN 12504, 2004).

Com a análise dos resultados, que consiste no estudo estatístico dos mesmos, pretende-se avaliar a confiabilidade dos dois métodos de avaliação do módulo para este formato de corpo-de-prova, assim como se busca verificar se há alguma relação que se possa estabelecer entre os resultados obtidos entre os diferentes métodos.

G.2. Artigo

O artigo enviado ao IBRACON se apresenta a seguir.