



**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE VIGAS DE  
MÁRMORE SINTÉTICO COM CARGA RECICLADA**

**RICARDO FOUAD RABAHI**

**TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE VIGAS DE  
MÁRMORE SINTÉTICO COM CARGA RECICLADA**

**RICARDO FOUAD RABAHI**

**ORIENTADOR: FLAMINIO LEVY NETO**

**TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**BRASÍLIA, DEZEMBRO DE 2015**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE VIGAS DE  
MÁRMORE SINTÉTICO COM CARGA RECICLADA

RICARDO FOUAD RABAHI

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.

APROVADA POR:



---

Prof. Flamínio Levy Neto, PhD., (ENM-UnB)  
Membro Interno vinculado ao Programa (Presidente)



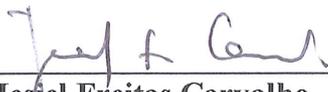
---

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, Dr., (ENM-UnB)  
Membro Interno vinculado ao Programa



---

Prof. Eder Lima de Albuquerque, Dr., (ENM-UnB)  
Membro Interno vinculado ao Programa



---

Prof. Jesiel Freitas Carvalho, Dr., (UFG)  
Membro Externo não vinculado ao Programa

---

Prof. Emmanuel Pacheco Rocha Lima Dr., (FGA-UnB)  
Membro Interno não vinculado ao Programa

BRASÍLIA/DF, 14 DE DEZEMBRO DE 2015.

## FICHA CATALOGRÁFICA

RABAHI, RICARDO FOUAD

Análise da resistência mecânica de vigas de mármore sintético com carga reciclada. [Distrito Federal] 2015.

xx, 170p, 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Doutor, Ciências Mecânicas, 2015).

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Mármore sintético

2. Ensaio de Flexão

3. Estatística de Weibull

4. Carga Mineral Reciclada

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RABAHI, R. F. (2015). Análise da resistência mecânica de vigas de mármore sintético com carga reciclada. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Publicação 32/2015, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 170p.

## CESSÃO DE DIREITOS

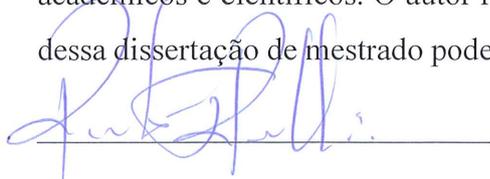
AUTOR: Ricardo Fouad Rabahi

TÍTULO: Análise da resistência mecânica de vigas de mármore sintético com carga reciclada

GRAU: Doutor

ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Ricardo Fouad Rabahi

Rua 227-A nº 246, Ap. 402, Setor Universitário.

74.610-155 Goiânia - GO - Brasil.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus que esteve sempre presente, me fazendo cada vez mais convicto da importância de nossa fé para alcançarmos os nossos objetivos.

Ao programa de Pós-Graduação da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, me dando condições de desenvolver o presente Trabalho de Doutorado, e em especial à direção e colaboradores do laboratório de Ensaios Mecânicos e aos funcionários do laboratório de usinagem.

À Empresa Marmorarte e a FAPEG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás), que em projeto paralelo, possibilitaram o desenvolvimento de parte da pesquisa.

Ao IFG Senador Canedo, que através de seu colegiado, possibilitou o meu afastamento para conclusão da fase final deste Trabalho.

Aos meus Pais, Fouad e Salem, de onde veio toda perseverança, e os mais nobres ensinamentos que possibilitaram a minha formação profissional, espiritual e familiar.

À minha esposa, Stella, que sempre me incentivou e não mediu esforços para possibilitar minhas viagens na conclusão deste e de todos os projetos ao longo de nossos 24 anos de casamento.

Aos nossos filhos, César, Antônio e Stéphane, que sempre foram a minha motivação maior para demonstrar a conduta de Retidão, Força e Esperança em transmitir os melhores valores para suas formações como pessoas de bem.

À Família da qual me sinto muito feliz de pertencer, e de onde vem, para mim, o significado mais sublime da palavra União.

Ao meu Orientador Flamínio, que me ensinou a essência e a importância de uma pesquisa científica, além de possibilitar a minha readaptação como aluno após 15 anos afastado da vida acadêmica. O Professor Flamínio, me deu vários exemplos de dedicação e doação à vida acadêmica, sendo para mim o significado mais puro da palavra PROFESSOR.

Aos Colegas Estevão, Júlio, Guilherme e Maurício, que me ajudaram, em algum momento do desenvolvimento desta Tese.

**MUITO OBRIGADO!!**

## RESUMO

### ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE VIGAS DE MÁRMORE SINTÉTICO COM CARGA RECICLADA

**Autor: Ricardo Fouad Rabahi**

**Orientador: Flaminio Levy Neto**

**Programa de Pós-graduação em Ciências Mecânicas**

**Brasília, Dezembro de 2015**

No presente trabalho aborda-se, através de análise estatística de Weibull como ferramenta de avaliação, a resistência mecânica à flexão e módulo de elasticidade de pedra sintética com matéria prima proveniente de processo de reaproveitamento como carga de origem natural (rejeitos de marmorarias), e sintética (rejeitos de pedra sintética), comparando-os com o mármore sintético produzido a partir de matéria prima virgem (extraída de jazidas naturais). O trabalho objetiva desenvolver novas formulações da pedra sintética, utilizando matéria prima reciclada, com a devida comprovação técnica de viabilidade do processo, prospectando uma solução trivial para a problemática de resíduos sólidos provenientes de indústrias de beneficiamento e transformação de pedras ornamentais e funcionais. O presente trabalho propõe também alterações na forma de ensaio de flexão de três pontos, para Corpos de Prova (CPs) com superfícies inferiores irregulares, criando condições para execução de um ensaio destrutivo de flexão pura nos CPs avaliados. Os resultados obtidos comprovam a viabilidade na reutilização do Mármore Sintético, quanto à resistência intrínseca do material, do primeiro ao quarto ciclo de reciclagem, alcançando 32% de acréscimo na resistência. Apresenta ainda como matéria prima alternativa o Rejeito de marmorarias com resultados 10% melhores que o calcário normalmente utilizado, tanto como mineral puro, como produto de reciclagens subsequentes, até o quarto ciclo (Grupo cuja densidade reduziu em 41%, valor mínimo absoluto entre as pedras sintéticas). Entretanto, em relação ao Módulo de Elasticidade E, o tanto Mármore Sintético como o Rejeito, tiveram queda de 13,0 GPa para 1,7 GPa em média, diminuindo sua rigidez. Através das ferramentas de análise das propriedades mecânicas, o trabalho contempla também a viabilização de Suporte Articulado como ferramenta de ensaios de flexão de três pontos, alternativa para CPs irregulares, tendo sido comprovada sua eficácia para o fim projetado, apresentando melhor repetibilidade nos ensaios, que os com suporte fixo convencional.

**Palavras - chave:** Mármore Sintético, Carga Mineral Reciclada, Estatística de Weibull.

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF MECHANICAL STRENGTH OF SYNTHETIC MARBLE BEAMS WITH RECYCLED AGGREGATE**

**Autor: Ricardo Fouad Rabahi,**

**Brasília, December, 2015.**

**Supervisor: Flamínio Levy Neto**

**Programa de Pós-graduação em Ciências Mecânicas**

The present study adopted the Weibull statistical analysis as a tool for evaluating the flexural strength and elasticity modulus of synthetic stone, with raw materials from recycling process as aggregate of natural origin (marble shops waste), as well as and synthetic (synthetic stone waste), and compared them with the synthetic marble produced from unused raw material (extracted from natural quarries). The objective of this work is to develop new formulations of synthetic stone with raw material recycled, with proper technical verification of the feasibility of the manufacturing process, prospecting a trivial solution to problems of solid waste from processing industries and of the transformation of ornamental and functional stones. Through the mechanical properties analysis tools, this study also proposes changes in the form of three-point bending test, for samples with irregular bottom surfaces, creating conditions for running a pure bending test in the evaluated samples. The results demonstrate the feasibility in the reuse of Synthetic Marble, in relation to intrinsic strength of the material, from the first to the fourth cycle of recycling, reaching 32% increase in resistance. It also presents as an alternative raw material, the waste of the stone processing industries (stone waste), with results 10% better than the limestone, typically used, both as pure mineral, as product in subsequent recycling, up to the forth cycle (the density of this Group reduced 41%, minimum absolut value considering the synthetic stones). However, in relation to the Elastic Modulus E, both, the Synthetic Marble and the stone waste, presented a reduction from about 13.0 GPa to 1.7 GPa on average, reducing its rigidity. Using analysis tools to evaluate mechanical properties, the work also includes the feasibility of Articulated Support as an alternative testing tool to perform three points bending tests in irregular samples testing tool bending three points alternative to irregular samples, having proven its effectiveness for the final purpose the end designed, with better repeatability in testing, and better results than the conventional fixed support.

**Keywords:** Cultured Marble, Recycled Aggregate, Weibull statistics, 3-Point Bending.

## Sumário

<b>1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.2 - ASPECTOS DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO MÁRMORE SINTÉTICO.....	6
1.3 - HIPÓTESE A COMPROVAR.....	8
1.4 - OBJETIVOS DO TRABALHO .....	8
1.5 - ESTRUTURA DA TESE .....	9
<b>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>10</b>
2.1 - ASPECTOS GERAIS .....	10
2.2 - ENSAIOS DESTRUTIVOS DE FLEXÃO .....	11
2.3 - ESTATÍSTICA DA FRATURA FRÁGIL .....	14
2.4 - MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	17
2.5 - ANÁLISE MICROGRÁFICA (INTERFACE CARGA- POLÍMERO).....	19
<b>3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL E TEÓRICA.....</b>	<b>21</b>
3.1 - MATERIAIS E CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	21
3.1.1 - Considerações Gerais .....	21
3.1.2 - Materiais Utilizados .....	23
3.1.3 - Preparação do molde.....	28
3.1.4 - Confecção dos Corpos de Prova (CPs) .....	29
3.1.5 - Desmoldagem e acabamento final dos Corpos de prova (CPs) .....	32
3.2 - METODOLOGIA DE ENSAIOS .....	33
3.2.1 - Método de Flexão de Três Pontos - ASTM D-790-90 .....	33
3.2.2 - Método de Flexão de Três Pontos com Suporte Articulado .....	36
3.3 - MODELAGEM MATEMÁTICA.....	41
3.3.1 - Considerações Gerais .....	41

3.3.2 - Momento de Inércia para Seções Irregulares.....	42
3.3.3 - Momento de Inércia ao longo do CP. ....	46
3.4 - METODOLOGIA ESTATÍSTICA DE WEIBULL.....	52
3.5 - ANÁLISE MICROGRÁFICA .....	57
<b>4 - RESULTADOS OBTIDOS. ....</b>	<b>60</b>
4.1 - CARACTERIZAÇÃO DA CARGA UTILIZADA .....	60
4.2 - CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA CONFECCIONADOS. ....	62
4.3 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E FÍSICAS .....	67
4.3.1 - Caracterização dos CPs. ....	67
4.3.2 - Execução das medições. ....	69
4.4 - RESULTADO DOS ENSAIOS DE FLEXÃO .....	70
4.4.1 - Resultado dos Ensaio Quanto ao Incremento Gradual de Reciclados .....	75
4.4.2 - Resultados dos Ensaio Quanto ao Número de Ciclos de Reciclagem .....	82
4.5 - RESULTADOS ANALÍTICOS E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	89
4.5.1 - Resultados Analíticos .....	89
4.5.2 - Resultados por Simulação Numérica.....	91
4.6 - RESULTADO DAS MICROGRAFIAS E MACROGRAFIAS .....	92
4.6.1 - Aspectos Macrográficos.....	92
4.6.2 - Aspectos Micrográficos.....	97
<b>5 - ANÁLISES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS. ....</b>	<b>100</b>
5.1 - CPS EQUIVALENTES ENSAIADOS EM SUPORTE FIXO E ARTICULADO, E COM ACRÉSCIMO GRADUAL DE RECICLADOS.....	100
5.1.1 - Avaliação da Resistência Intrínseca ( $\sigma_0$ ), quanto ao tipo de Suporte, Fixo e Articulado, e ao Acréscimo Gradual de Reciclados. ....	100
5.1.2 - Avaliação do Módulo de Weibull ( $m$ ), quanto aos suportes SA e SF e o Acréscimo Gradual de Reciclados.....	102

5.1.3 - Análise do Módulo de Elasticidade ( $E$ ), quanto ao Suporte Fixo e Articulado, e Acréscimo Gradual de Reciclados. ....	103
5.1.4 - Análise do Coeficiente de Variação ( $C.V.$ ) no Módulo de Elasticidade ( $E$ ), quanto ao Suporte Fixo e Articulado, e Acréscimo Gradual de Reciclados. ....	105
<b>5.2 - CPS EQUIVALENTES ENSAIADOS, COM E SEM DESBASTE SUPERFICIAL, QUANTO AOS CICLOS DE RECICLAGEM CONSECUTIVOS. ....</b>	<b>106</b>
5.2.1 - Avaliação da Resistência Intrínseca ( $\sigma$ ), quanto ao Desbaste Superficial e Quanto aos Ciclos de Reciclagem Consecutivos .....	107
5.2.2 - Avaliação do Módulo de Weibull ( $m$ ), Quanto ao Desbaste Superficial e Quanto aos Ciclos de Reciclagem Consecutivos.....	109
5.2.3 - Análise do Módulo de Elasticidade ( $E$ ), Quanto ao Desbaste Superficial e Quanto aos Ciclos de Reciclagem Consecutivos .....	110
5.2.4 - Análise do Coeficiente de Variação ( $C.V.$ ) no Módulo de Elasticidade ( $E$ ), Quanto ao Desbaste Superficial e Quanto aos Ciclos de Reciclagem Consecutivos.....	111
<b>5.3 - QUANTO À REUTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINERAIS E SINTÉTICOS.....</b>	<b>112</b>
<b>5.4 - QUANTO ÀS ANÁLISES MACROGRÁFICAS E MICROGRÁFICAS....</b>	<b>115</b>
5.4.1 - Análise Macrográfica da Fratura dos CPs.....	115
5.4.2 - Aspectos Micrográficos.....	118
<b>5.5 - ANALISE DOS RESULTADOS OBTIDOS POR ELEMENTOS FINITOS. ....</b>	<b>119</b>
<b>5.6 - ANALISE DOS RESULTADOS PELO INDECE (<math>M*CV</math>).....</b>	<b>128</b>
<b>6 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>131</b>
<b>7 - BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>134</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>140</b>

<b>ANEXO B - EXEMPLO DE DADOS DO ENSAIO MTS .....</b>	<b>142</b>
<b>ANEXO C - DADOS DOS CORPOS DE PROVA.....</b>	<b>144</b>
<b>ANEXO D - DADOS OBTIDOS POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....</b>	<b>168</b>

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 3. 1 - Adaptado da norma ASTM E 11 87 .....	24
Tabela 3. 2 - Fórmulas para obtenção Tensão normal de flexão ( $\sigma$ ) e Módulo de elasticidade (E) .....	35
Tabela 3. 3 - Tabela de dados para aquisição de dados do programa de simulação.....	49
Tabela 3. 4 - Formato de dados obtidos pela simulação numérica e pelo método analítico do Grupo 22 .....	50
Tabela 4. 1 - Características dos grupos de CPs confeccionados .....	62
Tabela 4. 2 - Dados de caracterização do grupo 8.....	69
Tabela 4. 3 - Quantidade ensaios por grupo, diferenciadas por tipo de suporte.....	72
Tabela 4. 4 - Dados obtidos dos ensaios (total de 35), do grupo 43 (Reciclagem de 2º ciclo), sendo 20 ensaios sem Desbaste e 15 com a superfície inferior desbastada.....	73
Tabela 4. 5 - Cálculo para obter-se o Módulo de Weibull $m$ e a Resistência Intrínseca $\sigma_0$ , através do método da posição relativa. ....	74
Tabela 4. 6 - Comparação entre resultados totais, com suporte <b>Fixo</b> e <b>Articulado</b> .....	75
Tabela 4. 7 - Resultados totais de cada Grupo .....	76
Tabela 4. 8 - Resultados dos grupos de ensaios com SA, Parciais e Totais .....	78
Tabela 4. 9 - Resultados obtidos somente com ensaios através do SF.....	80
Tabela 4. 10 - Comparação entre resultados totais e parciais dos grupos com e sem Desbaste.....	82
Tabela 4. 11 - Resultado geral dos grupos incluindo CPs sem e com desbaste. ....	83
Tabela 4. 12 - Tabela de Grupos Totais e Parciais, dos Grupos 39 ao 44, e Grupo ara, todos sem Desbaste na face inferior do CP. ....	84
Tabela 4. 13 - Tabela com resultados dos ensaios dos CPs que sofreram acabamento superficial, na superfície inferior.....	86

Tabela 4. 14 - Comportamento dos rejeitos de marmorarias quanto a ciclos consecutivos de reciclagem.....	88
Tabela 4. 15 - Exemplo de variação de espessuras na seção de ruptura do Grupo 8. ....	90
Tabela 4. 16 - Módulo de Elasticidade Média ( $E$ ) e Coeficiente de Variação (C.V.) Por Simulação Numérica em SF e SA. ....	91
Tabela 4. 17 - Tensão Ruptura Média ( $\sigma_n$ ) e Coeficiente de Variação (C.V.) Por Simulação Numérica em SF e SA .....	91
Tabela 5. 1 - Diferenças entre resultados obtidos com Suporte Fixo e Suporte Articulado dentro do mesmo Grupo de ensaio com <b>mesma composição</b> .....	100
Tabela 5. 2 - Média do Módulo de Weibull e Coeficiente de Variação C.V. ....	103
Tabela 5. 3 - Módulo de Elasticidade ( $E$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SA .....	120
Tabela 5. 4 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Módulo de Elasticidade ( $E$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SA .....	121
Tabela 5. 5 - Módulo de Elasticidade ( $E$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF.....	122
Tabela 5. 6 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Módulo de Elasticidade ( $E$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF.....	123
Tabela 5. 7 - Tensão Ruptura ( $\sigma$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SA.....	124
Tabela 5. 8 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Módulo de Elasticidade Médio ( $E_m$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SA .....	125
Tabela 5. 9 - Tensão Ruptura Média ( $\sigma$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF.....	126
Tabela 5. 10 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Tensão de ruptura ( $\sigma$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF .....	127
Tabela 5. 11 - Índice de correspondência entre Coeficiente de Variação C.V. e modulo de Weibull ( $m$ ) , entre SA e SF em relação ao acréscimo de reciclados. ....	128
Tabela 5. 12 - Variação do Índice de correspondência entre $m$ e C.V.....	129
Tabela a. 1 - PROPRIEDADES DA RESINA LÍQUIDA AZ 3.7 - Padrão.....	141
Tabela a. 2 - Propriedades típicas do fabricante (Ara Química), Resina AZ 3.7 .....	141

Tabela a. 3 - Propriedades típicas do fabricante (Reichhold) da Resina PolyLite® 32135-00 - Engineered.....	141
Tabela b. 4 - Tabela exemplo de dados obtidos do CP grupo 22 - através da MTS 810 .....	142
Tabela c. 5 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 16.....	145
Tabela c. 6 - Dados dos CPs - Grupo 17 .....	146
Tabela c. 7 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 16.....	147
Tabela c. 8 - Dados dos CPs - Grupo 18 .....	148
Tabela c. 9 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 16.....	149
Tabela c. 10 - Dados dos CPs - Grupo 19 .....	150
Tabela c. 11 - Dados dos CPs - Grupo 20 .....	151
Tabela c. 12 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 20.....	152
Tabela c. 13 - Dados dos CPs - Grupo 21 .....	153
Tabela c. 14 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 21.....	154
Tabela c. 15 - Dados dos CPs - Grupo 22 .....	155
Tabela c. 16 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 22.....	156
Tabela c. 17 - Dados dos CPs - Grupo 23 .....	157
Tabela c. 18 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 23.....	158
Tabela c. 19 - Dados dos CPs - Grupo 22 .....	159
Tabela c. 20 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 24.....	160
Tabela c. 21 - Dados dos CPs - Grupo 25 .....	161
Tabela c. 22 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 25.....	162
Tabela c. 23 - Dados dos CPs - Grupo 26 .....	163
Tabela c. 24 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 26.....	164

Tabela c. 25 - Dados dos CPs - Grupo 27 .....	165
Tabela c. 26 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 16.....	166
Tabela c. 27 - Dados dos CPs - Grupo 32 .....	167
Tabela c. 28 -Resultado obtido de análise por Simulação Numérica em comparação aos resultado obtidos por Método Analítico - Grupo 16 .....	168
Tabela c. 29 - Resultado obtido de análise por Simulação Numérica em comparação aos resultado obtidos por Método Analítico - Grupo 17 .....	169
Tabela c. 30 - Resultado obtido de análise por Simulação Numérica em comparação aos resultado obtidos por Método Analítico - Grupo 18 .....	170

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 2. 1 - (a) O teste de flexão de três pontos (b) a deflexão após aplicação da carga, adaptado de Askland et al, (2011) .....	13
Figura 2. 2 - Ilustração esquemática de suporte articulado, segundo Frischholz (2004) 14	
Figura 2. 3 - Simulação de carregamento de CP irregular na flexão de três pontos .....	19
Figura 2. 4 - Ação de tratamento superficial para melhoramento na interface carga - polímero, Turella et al, (2013).....	20
Figura 3. 1- Ensaio destrutivo de Flexão em três pontos, Rabahi, et al., (2007).....	21
Figura 3. 2 (a) - Rejeitos de rocha natural.....	25
Figura 3. 2 (b) - Rejeito de pedras sintéticas.....	25
Figura 3. 3 (a) - Rejeito pós Britado.....	25
Figura 3. 3 (b) - Rejeito pós moinho .....	25
Figura 3. 4 (a) - Peneira ASTM 20 - Mesh/Tyler - 20.....	26
Figura 3. 5 - Molde em fibra de vidro para confecção dos CPs .....	28
Figura 3. 6 - Modelo de CP adotado.....	29
Figura 3. 7 - Masseur planetária utilizada também em panificação. ....	30
Figura 3. 8 - Massa de rejeito de rochas naturais sendo misturada. ....	31
Figura 3. 9 - Massa sendo espalhada no molde. ....	31
Figura 3. 10 - Disposição dos CPs no molde.....	32
Figura 3. 11 - CPs antes da desmoldagem e depois de cortados com disco de corte. ....	32
Figura 3. 12 - Ensaio de flexão e distribuição de tensão na seção transversal do CP ....	34
Figura 3. 13 - Gráfico obtido através do ensaio de flexão de três pontos .....	36

Figura 3. 14 - Moldagem dos CPs .....	36
Figura 3. 15 - CP com pequena irregularidade apoiado em suporte fixo .....	37
Figura 3. 16 - CP com grande irregularidade apoiado em suporte fixo.....	37
Figura 3. 17 - Correção com lamina de papel.....	37
Figura 3. 18 - Correção com lamina de papel.....	37
Figura 3. 19 - Defeito acentuado na base inferior antes da carga.....	38
Figura 3. 20 - Ensaio de Flexão em três pontos: (a) Suporte com apoios fixos, (b) suporte com apoios articulados .....	38
Figura 3. 21 (a) - Elaboração do Suporte Articulado, (b) - Suporte Articulado ameniza a necessidade de correção manuais. ....	39
Figura 3. 22 - Acomodação do CP com a Aplicação da Pré carga.....	40
Figura 3. 23 - Diagrama do Processo de confecção ao processo de ensaio dos CPs.....	41
Figura 3. 24 - Diagrama de esforços e momentos fletores em ensaio de flexão de três pontos (adaptado de Askeland et al, (2008)). ....	42
Figura 3. 25 - Seção irregular na região de maior sollicitação. ....	42
Figura 3. 26 - Variação de espessura do CP A5- Grupo 15, na seção transversal.....	43
Figura 3. 27 - Seção transversal de uma viga trapezoidal .....	43
Figura 3. 28 - Composição da seção apresentada na Figura (3.25).....	43
Figura 3. 29 - Pontos de medição pós ruptura .....	45
Figura 3. 30 - Posição das medidas 5, 6, 7 e 8 no CP padrão e exemplo de medidas irregulares no CP C3 grupo 25 .....	46
Figura 3. 31 (a) - Fracionamento das seções do CP, (b) - Discretização do CP em Elementos prismáticos.....	47
Figura 3. 32 - Legenda utilizada nas tabelas para identificação de dados quanto ao tipo de suporte e o método de cálculo utilizados, e acabamento superficial do CP. ....	48
Figura 3. 33 - Simulação numérica (ANSYS) da distribuição de tensão do CP .....	51
Figura 3. 34 - Simulação numérica (ANSYS) da distribuição de tensão do CP .....	51
Figura 3. 35 - Simulação de torsão provocada por desalinhamento no suporte.....	52
Figura 4. 1 - Amostra de Calcário em Análise de difração de Rx, Realizada no Laboratório do CRTI, na Universidade Federal de Goiás .....	60
Figura 4. 2 - Amostra de Rejeito de marmoraria em Análise de Difração de Rx, no Laboratório CRTI, na UFG .....	61

Figura 4. 3 - Amostra de Mármore Sintético em Análise de difração de Rx, Realizada no Laboratório do CRTI, na Universidade Federal de Goiás .....	61
Figura 4. 4 - Volume de massa sendo espalhado no molde subdividido em Filetes de 1000mm x 40mm) .....	63
Figura 4. 5 - Parâmetros de medição .....	68
Figura 4. 6 - Molde para fabricação dos CPs - Distribuição dos CPs .....	68
Figura 4. 7 - Confeção de suporte de ensaio de flexão de três pontos.....	70
Figura 4. 8 - Máquina Universal de Ensaio Mecânicos MTS 09 - 05.....	71
Figura 4. 9 - Recipiente de contenção, essencial para ruptura de materiais que produzem pequenas partículas abrasivas.....	71
Figura 4. 10 - Gráfico da Resistência Intrínseca ( $s_0$ ) x % de Reciclados na composição .....	76
Figura 4. 11 - Variação do Módulo Weibull $m$ na medida em que se aumenta o índice de reciclados.....	77
Figura 4. 12 - Gráfico do Módulo de elasticidade ( $E$ ) x % de Reciclados na composição .....	77
Figura 4. 13 - Comportamento do Coeficiente de Variação $CV$ em relação ao Módulo de elasticidade $E$ quanto a inserção gradual de Reciclados.....	77
Figura 4. 14 - Gráfico da Resistência Intrínseca ( $\sigma_0$ ) x % de Reciclados na composição, somente com Grupos ensaiados com SA.....	78
Figura 4. 15 - Variação do Módulo Weibull $m$ na medida em que se aumenta o índice de reciclados, somente com Grupos ensaiados com SA. ....	79
Figura 4. 16 - Gráfico do Módulo de elasticidade ( $E$ ) x % de Reciclados na composição, somente com Grupos ensaiados com SA.....	79
Figura 4. 17 - Comportamento do Coeficiente de Variação $CV$ em relação ao Módulo de elasticidade $E$ quanto a inserção gradual de Reciclados em ensaios com SA.....	79
Figura 4. 18 - Comportamento da Resistência Intrínseca $\sigma_0$ com a variação de matéria prima reciclada. ....	81
Figura 4. 19 - Variação do Módulo Weibull $m$ , na medida em que se aumenta o índice de reciclados, somente com Grupos ensaiados com SF. ....	80
Figura 4. 20 - Gráfico do Módulo de elasticidade ( $E$ ) x % de Reciclados na composição, somente com Grupos ensaiados com SF. ....	81
Figura 4. 21 - Comportamento do Coeficiente de Variação $CV$ em relação ao Módulo de elasticidade $E$ quanto a inserção gradual de Reciclados em ensaios com SF.....	81

Figura 4. 22 - Avaliação da Resistência Intrínseca $\sigma_0$ na medida que se avança o número de ciclos de reciclagens. ....	83
Figura 4. 23 - Variação do Módulo Weibull $m$ , na medida em que se aumenta o números de ciclos. ....	83
Figura 4. 24 - Gráfico do Módulo de elasticidade ( $E$ ) x Números de ciclos Avaliando o Grupo na totalidade. ....	84
Figura 4. 25 - Comportamento do Coeficiente de Variação $CV$ em relação ao Módulo de elasticidade $E$ quanto ao número de ciclos. ....	84
Figura 4. 26 - Comportamento da Resistência Intrínseca, $\sigma_0$ , na medida que se avança o número de ciclos de reciclagens em CPs sem desbastes. ....	85
Figura 4. 27 - Resistência Intrínseca, $\sigma_0$ , na medida que se avança o número de ciclos de reciclagens. ....	85
Figura 4. 28 - Gráfico do Módulo de elasticidade ( $E$ ) x Números de ciclos Avaliando os Grupos parciais com desbastes ....	85
Figura 4. 29 - Comportamento do Coeficiente de Variação $CV$ em relação ao Módulo de elasticidade $E$ quanto ao número de ciclos. ....	86
Figura 4. 30 - Comportamento da Resistência intrínseca $\sigma_0$ , em Ciclo Consecutivos de reciclagem em material com acabamento superficial inferior ....	86
Figura 4. 31 - Variação do Modulo de Weibull no 2º, 3º e 4º ....	87
Figura 4. 32 - Gráfico do Módulo de elasticidade ( $E$ ) x Números de ciclos Avaliando os Grupos parciais com desbastes ....	87
Figura 4. 33 - Comportamento do Coeficiente de Variação $CV$ em relação ao Módulo de elasticidade $E$ quanto ao número de ciclos, para CPs desbastados. ....	87
Figura 4. 34 - Gráfico da Resistência Intrínseca $\sigma_0$ , em relação à reciclagem de Rejeitos de rochas e sintéticos. ....	88
Figura 4. 35 - Variação do Módulo de Weibull $m$ , em relação à reciclagem de Rejeitos de marmorarias em 1º e 2º ciclos e utilização de calcário puro, (sem reciclados). ....	88
Figura 4. 36 - Variação do Módulo de Elasticidade $E$ , em relação à reciclagem de Rejeitos de marmorarias em 1º e 2º ciclos e utilização de calcário puro. ....	89
Figura 4. 37 - comportamento do coeficiente de variação $CV$ em relação à reciclagem de Rejeitos de marmorarias em 1º e 2º ciclos e utilização de calcário puro. ....	89
Figura 4. 38 - Posicionamento e caracterização do ponto de aplicação da carga. ....	92
Figura 4. 39 - CP DII do Grupo 25 após a fratura. ....	92
Figura 4. 40 - Fratura ocorrida transversalmente do CP CIV - 25. ....	93

Figura 4. 41 - Detalhe de fratura ocorrida exatamente na região da atuação da força porem com desvios de acordo com presença de bolhas, CP CIV do Grupo 25. ....	93
Figura 4. 42 - Ocorrência de fratura fora do ponto central de apoio do atuador. ....	93
Figura 4. 43 - Fratura na diagonal do eixo de atuação da carga. CP EIII Grupo 25. ....	94
Figura 4. 44 - Ensaio do grupo 43 sem ocorrência de fratura diagonal. ....	94
Figura 4. 45 - Detalhe da fratura do CP BIV do Grupo 41. ....	94
Figura 4. 46 - Grupo 41 com algumas fraturas em diagonal. ....	95
Figura 4. 47 - CPs de Resina Pura após os Ensaio de Flexão. ....	95
Figura 4. 48 - CPs característicos do Grupo 44, reciclados de 4º ciclo.....	96
Figura 4. 49 - Fraturas do Grupo 42, características intermediarias entre 43 2ºciclo e 44 4ºciclo. ....	96
Figura 4. 50 - Tonalidade natural dos materiais sem nenhum tipo de pigmentação. ....	96
Figura 4. 51 - Evidências de descolamento entre matriz polimérica e partículas de carga, bem como evidências de aderência de partícula fissurada por possível aderência na matriz polimérica.....	97
Figura 4. 52 - Micrografias do CP 18 - CIV, mostra falta de aderência entre partículas e polímero, com espaços vazios entre eles. ....	98
Figura 4. 53 - CP AIV do Grupo 22, partícula descoladas da matriz poliméricas .....	98
Figura 4. 54 - Partículas minerais totalmente sem interface com a matriz polimérica. .	99
Figura 5.1 - Comparação de Valores de $\sigma_0$ entre ensaios com SA e SF.....	101
Figura 5.2 - Variação da Resistência Intrínseca, $\sigma_0$ , com o acréscimo de Reciclados. ....	102
Figura 5.3 - Dispersão dos resultados do Módulo de Weibull ( $m$ ).....	102
Figura 5.4 - Avaliação do Módulo de Weibull ( $m$ ), com a variação do percentual de reciclados. ....	103
Figura 5. 5 - comparação entre valores do Módulo de Elasticidade $E$ , de CPs ensaiados nos Suportes Fixo e Articulado. ....	104
Figura 5. 6 - Avaliação do Módulo de Elasticidade $E$ com o aumento gradual de reciclados. ....	104
Figura 5. 7 - Avaliação do Coeficiente de Variação C.V. dos resultado do Módulo de Elasticidade, comparando SA com SF. ....	105
Figura 5. 8 - Tendência do Coeficiente de Variação C.V., do Módulo de elasticidade com o aumento de reciclados na composição dos CPS. ....	106

Figura 5. 9 - Avaliação da Resistência Intrínseca quanto ao desbaste superficial inferior do CPs.....	107
Figura 5. 10 - Comportamento da Resistência Intrínseca quanto à variação do número de ciclos .....	108
Figura 5. 11 - Composição polímero x carga mineral a cada ciclo .....	108
Figura 5. 12 - Módulo de Weibull ( $m$ ), quanto ao desbaste superficial .....	109
Figura 5. 13 - Módulo de Weibull ( $m$ ), quanto aos ciclos de reciclagem consecutivos	109
Figura 5. 14 - Módulo de Elasticidade $E$ no CPs Sem Desbaste e Com Desbaste .....	110
Figura 5. 15 - Comportamento do Módulo de elasticidade $E$ com aumento dos Ciclos. ....	111
Figura 5. 16 - Coeficiente de Variação do Módulo de Elasticidade em relação ao desbaste do CP.....	111
Figura 5. 17 - Tendência de evolução do C.V. em relação aos ciclos. ....	112
Figura 5. 18 - Variação da Resistência Intrínseca de acordo com tipo de matéria prima, Mineral e Sintética.....	113
Figura 5. 19 - Dispersão do resultados do Módulo de Weibull $m$ , com a variação da matéria prima.....	113
Figura 5. 20 - Variação do Módulo de elasticidade entre CPs produzidos a partir de Matéria Prima Mineral (Grupos 25 e 26) e Matéria Prima Sintética (Grupos 27 e 32)	114
Figura 5. 21 - Avaliação do C.V. do nos CPs provindos de , Calcário (Grupos 25 e 27) e Rejeito (Grupos 26 e 32).....	114
Figura 5. 22 - Exemplo de ensaios Em suportes Fixos e Articulados que a fratura ocorreu no diagonal ao plano de atuação da força.....	116
Figura 5. 23 - Exemplo de ensaios Em suportes Fixos e Articulados que a fratura ocorreram no paralelo ao plano de atuação da força. ....	116
Figura 5. 24 - Exemplo de ensaios Em suportes Fixos e Articulados que a fraturas ocorreram de forma aleatória fora do centro de atuação da força. ....	117
Figura 5. 25 - Exemplo de ensaios Em suportes Fixos e Articulados que a fratura ocorreram no centro de atuação da força (1). ....	117
Figura 5. 26 - Exemplo de ensaios Em suportes Fixos e Articulados que a fratura ocorreram no centro de atuação da força (2). ....	117
Figura 5. 27 - Micrografia ilustrando descolamento de partícula mineral da matriz polimérica. ....	118

Figura 5. 28 - Micrografia em amostra de rejeito mantendo boa parte da aderência com a contração da matriz polimérica.....	119
Figura 5. 29 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Módulo de Elasticidade (E) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SA .....	121
Figura 5. 30 - Módulo de Elasticidade (E) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF.....	122
Figura 5. 31 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Módulo de Elasticidade (E) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF.....	123
Figura 5. 32 - Tensão Ruptura ( $\sigma$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SA.....	124
Figura 5. 33 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Módulo de Elasticidade Médio (E) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SA .....	125
Figura 5. 34 - Tensão Ruptura ( $\sigma$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF.....	126
Figura 5. 35 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Tensão de Ruptura ( $\sigma$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF .....	127
Figura 5. 36 - Variação do Índice de correspondência de ( $m*CV$ ), em SF e SA. ....	128
Figura 5. 37 - Variação do Índice de correspondência de ( $m*CV$ ), em Sem Desbaste e Com Desbaste.....	130
Figura 8. 1 - Exemplo de diagrama Carga x deflexão obtido no ensaio de flexão.....	143

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

$\sigma$ .....	- tensão aplicada
$\sigma_u$ .....	- tensão na qual a probabilidade de falha é nula
$\sigma_o$ .....	- resistência característica ou resistência intrínseca
$\sigma_{max}$ .....	- Tensão de ruptura máxima
$V_0$ .....	- volume constante dos corpos de prova
$PS(V_0)$ .....	- probabilidade de sobrevivência de um volume $V_0$
$F(V_0)$ .....	- probabilidade de falha de um volume $V_0$
$E$ .....	- módulo de elasticidade em flexão
$m$ .....	- módulo de Weibull
$f$ .....	- deslocamento vertical ou flecha ou deflexão
$t$ .....	- espessura da sessão transversal no ponto de aplicação da força P
$y$ .....	- metade da altura de uma secção transversal retangular ( $t/2$ )
$b$ .....	- largura da sessão transversal no ponto de aplicação da força P
$L$ .....	- Distância entre apoios inferiores do suporte de ensaio
$l$ .....	- Comprimento dos CPs
CPs -.....	- Corpos de prova
$I$ .....	- É o momento de inércia de área de uma secção transversal retangular ( $b.t^3/12$ )
SA.....	Suporte Articulado
SF.....	- Suporte Fixo
MA.....	Metodo Analítico de Cálculo
SM.....	Simulação Numérica.

# 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Desde a revolução industrial, além do crescimento populacional exponencial, individualmente as pessoas vem consumindo e descartando bens e produtos, cada vez em maior quantidade. Como consequência, passamos atualmente por uma crise de escassez de matérias primas sem precedentes na história. A esta crise é acrescida a devastação ambiental que inclui a contaminação e o envenenamento da atmosfera, do solo e de mananciais de água. E, como raros são os que tem consciência da necessidade de consumir menos, a destruição do planeta já ameaça a qualidade de vida e a sobrevivência de muitos. Neste contexto, uma das poucas esperanças que ainda resta é a reciclagem de matérias primas e produtos descartados.

A utilização de pedras e rochas como ornamentos e peças funcionais, bem como o desenvolvimento de novos materiais de engenharia aplicados na construção civil, em revestimentos especiais, e construção mecânica tais como: mesas de desempenho e base para instrumentos; estruturas de suporte para equipamentos de precisão, com alta resistência à corrosão e boas propriedades de amortecimento de vibrações (Ribeiro e Purquerio, 1999), tem motivado o surgimento de um grande número de aplicações tecnológicas; e, em consequência, forçado as empresas produtoras e beneficiadoras de pedras buscarem soluções inteligentes e criativas para dar versatilidade aos projetos inovadores e desafiadores nos últimos anos, Mothé, (2002).

A rocha, desde a idade da pedra, vem sendo utilizada pelo homem em diferentes aplicações e, pela sua abundância na natureza, nunca deixou de ter importância fundamental no dia a dia dos seres humanos. Em tempos mais recentes, com a necessidade de adaptar e moldar pedras em formatos específicos, ocorreu o surgimento das pedras sintéticas, semelhantes aos mármore e aos granitos, que a princípio possuíam características e propriedades inferiores à da pedra natural, mas que ao longo dos anos propiciaram o surgimento de diferentes variações de pedras sintéticas de propriedades e características superiores às da pedra natural, Rabahi, (2010).

A **Rocha Natural**, mineral de inúmeras composições, é extraído da Natureza na forma de blocos. São transformados em placas ou lapidados em formas específicas, para comercialização.

Já **Pedras Sintéticas** são compósitos de matriz poliméricas com grande variedade, dentre eles: o **Mármore Sintético** que utiliza-se como carga mineral básica o Carbonato de Cálcio (CaCO<sub>3</sub>), Principal constituinte do mármore natural; e o **Granito Sintético** utiliza-se como carga mineral básica o Granito moído.

Ribeiro, (2011), estudou a viabilidade da produção de ladrilhos compósitos de rocha artificial com matriz de polímero termofixo, para revestimento de interiores pelo processo de moldagem por transferência de resina (RTM). Este processo, não é muito utilizado na produção de mármore sintético convencional, mas que visa obtenção de placas com bom acabamento superficial em ambas faces; e boa compactação dos constituintes, pela injeção de resina líquida em uma matriz fechada, com a utilização de carga mineral reciclada já inserida no molde. O domínio da produção de rocha artificial, a partir dos rejeitos, pode oferecer aos países produtores de rochas ornamentais, como o Brasil, meios para a redução dos volumes de rejeitos descartados diariamente.

Ainda com relação ao reaproveitamento de resíduos, Binicia et al, (2007), trabalharam com a importância da durabilidade dos materiais oriundos de resíduos de diversos processos de beneficiamentos de rochas, resíduos de auto fornos e areia de rio, como matérias primas para produção de concreto, encontrando bons resultados para o reaproveitamento dos resíduos provindos de rochas naturais.

A responsabilidade pela destinação de rejeitos de processos industriais de beneficiamento de pedras naturais, passou a ser condição necessária para o funcionamento de toda empresa geradora de resíduos sólidos em nosso país. A partir da aprovação da Lei 12.305/10, às empresas cabe a correta destinação dos resíduos sólidos. Segundo dados da Política Nacional de Resíduos Sólidos, PNRS, a lei em epígrafe ajudará o Brasil a atingir uma das metas do Plano Nacional sobre Mudança do Clima, que é de alcançar o índice de reciclagem de resíduos de 20%, em 2015.

A constante preocupação com a extração de recursos naturais motiva a procura por alternativas de reaproveitamento de cargas de enchimento artificiais, em substituição às naturais, oriundas de reciclagem, como forma de redução de custo e solução ambiental, conforme propõe Ribeiro (2011, p4):

*“A incorporação do resíduo de mármore em polímeros pode atuar de duas formas benéficas ao meio ambiente: por um lado, parte dos resíduos da indústria de rochas*

*ornamentais poderão ser reaproveitados, reduzindo a área utilizada para descarte e os custos envolvidos nesta operação, por outro, a exploração de jazidas calcárias poderá ser reduzida e o material a ser incorporado não necessitará de tratamentos de britagem primária, reduzindo os custos com material”.*

Uma das pedras sintéticas mais comuns no mercado, o Mármore Sintético, está longe de ser uma novidade comercial, sendo sua aplicação mais usual em pias, tanques e lavatórios na indústria da construção civil, com grande flexibilidade de tamanhos e formas, característica de seu processo de moldagem. Em função do aumento da competitividade este tem se tornado um produto cada vez mais fino e leve e com as mais variadas dimensões. Sem uma normatização específica no Brasil, as empresas têm buscado, através do apelo do baixo custo, encontrar soluções para se manterem competitivas no mercado, seja buscando novas formas ou novas composições, Rabahi, 2010.

O Granito Sintético, com menor inserção de mercado em função do maior custo da carga mineral, e da menor oferta no comércio, pode, a partir da comprovação dos resultados de reutilização de rejeitos ganhar força e competitividade de mercado. A extração do mesmo, especificamente para produção de carga mineral é mais onerosa, sendo nesse caso mais utilizado como pedra ornamental natural.

A importância da utilização de pedras sintéticas na engenharia vem sendo expandida, na medida que se ampliam os estudos comprobatórios das qualidades destes produtos, como pode-se observar no trabalho proposto por Ribeiro et al (1999), que propõe a utilização do Granito Sintético como base de instrumentos de precisão de pequeno porte devido suas qualidades de material absorvedor de vibrações, com excelentes propriedades de estabilidade dimensional e inércia química (resistência à corrosão). Ressalta-se ainda a facilidade de moldagem a frio, o que é extremamente benéfico aos custos de produção e possibilita que esse produto possa substituir com eficiência materiais mais caros como alumínio fundido, e bem mais pesados além de sensíveis à oxidação como o ferro fundido, dentre outros.

Já em estudos como o apresentado por Rabahi (2010), onde é proposta a mixagem de dois produtos presentes no mercado de forma separada, fibras de vidro-E picadas e/ou carga mineral em matriz de resina poliéster, e a mistura deles agrega grandes vantagens de melhoramento da resistência mecânica à flexão ao mármore sintético, ampliando assim a

gama de utilizações e a performance nas aplicações convencionais, mostrando que a pedra sintética pode ocupar um espaço ainda maior no nosso cotidiano.

O reaproveitamento de materiais provindos de produtos termofixos, tem sido matéria de estudo em várias partes do mundo, e na tentativa de buscar solução para os resíduos de fibra de vidro Ribeiro et al (2011), propôs um material compósito a partir de rejeitos de fibra de vidro picotada, na composição do novo produto, obtendo também excelentes resultados com produtos residuais como matéria prima.

No presente estudo, espera-se além de realizar a avaliação de desempenho das propriedades do produto do material reciclado, tornar a produzir o mesmo produto com vários ciclos de reciclagem avaliando assim, o comportamento deste desempenho ao longo dos ciclos de reciclagem, bem como avaliar sua aplicação relativa ao material produzido com matéria prima virgem e acrescida com graduações crescentes de material reaproveitado.

No reaproveitamento de pedras naturais, os estudos não têm tido maior abrangência em função da grande oferta de rochas e minérios existentes no mundo inteiro, que, por serem de baixo valor agregado e de muita abundância, não despertavam grande interesse em pesquisas de reaproveitamento. Porém, com o aprimoramento dos estudos e conscientização ecológica muitos trabalhos têm como foco o reaproveitamento do Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) em processos de fabricação de sinterização, como em Bilgin, et al, (2011), O mármore branco é composto basicamente de Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), Sampaio e Almeida (2005).

De uma forma geral, a reciclagem de componentes descartados de materiais compósitos, ou simplesmente de resíduos sólidos, que possam ser utilizados como cargas de enchimento ou de reforço de novos produtos, tem tomado um caminho sem volta na sua consolidação econômica e viabilização de processos, através dos trabalhos e estudos comprobatórios das qualidades desses materiais reaproveitados. Mas, fundamentalmente, o apelo é ainda maior quando se avalia a sustentabilidade de trabalhos como o proposto por Bilgin, et al, (2011), e os que são mostrados por Lee et al, (2008) e Reis et al, (2011), que demonstram melhoramentos em propriedades mecânicas com a reutilização de resíduos sólidos.

O problema ambiental provocado por alguns tipos de resíduos sólidos inertes, como é o caso dos resíduos de pedra natural, pode não ter um grande impacto de forma direta,

através de contaminação, mas tem na energia e trabalhos desenvolvidos, desde sua extração até a finalidade do consumo, que sem dúvida, deixam um débito ambiental importante. A conscientização ecológica mundial, tem buscado soluções inteligentes e práticas, para se evitar esse impacto ambiental provocado pela extração de produtos da natureza em detrimento da utilização de material reaproveitado de diversas formas, como pode ser observado no trabalho de Gencel et al, (2011), que também buscou, no reaproveitamento de resíduos de pedras a solução de agregados para fabricação de blocos de cimentos, e encontrou resultados interessantes, apesar de uma perda em resistência mecânica, obteve-se uma melhora na capacidade de absorções de dilatação térmica em blocos de pavimentação, tendo maior resistência ao congelamento e descongelamento, bem como uma melhora da capacidade de resistência abrasiva.

A questão ecológica com relação aos produtos utilizados na construção civil vem ganhando muito espaço em áreas de pesquisa devido ao grande desenvolvimento experimentado pelas nações em desenvolvimento, abrindo um grande espaço para pesquisa de novos produtos que sejam ecologicamente corretos, e que possam ainda se utilizar de matérias primas oriundas dos rejeitos do processo de produção ou do próprio produto já utilizado pelo consumidor, mas que deve-se levar em consideração que além de ecologicamente correto, o novo produto deve apresentar características produtivas viáveis, como podemos observar no trabalho desenvolvido por Bribian, et al (2010), que apresenta os resultados de um estudo que compara materiais de construção convencionais com alguns materiais ecológicos, que tem como objetivo aprofundar a análise das possibilidades de melhoria dos produtos, fornecendo orientações para a seleção de materiais na concepção ecologicamente correta dos edifícios novos e de reabilitação dos edifícios existentes. O estudo mostra que o impacto dos produtos de construção pode ser significativamente reduzido ao se promover dentre outras ações, melhorias técnicas e inovações ecológicas nas linhas de produção, substituindo o uso de recursos naturais finitos por resíduos gerados nos processos de produção, estimulando a concorrência entre os fabricantes a lançar produtos mais ecologicamente corretos.

A importância ecológica do presente estudo deverá ainda ser ressaltada uma vez que, além de reduzir a necessidade de extração de matéria prima mineral natural, como o carbonato de cálcio, irá também minimizar o impacto ambiental que poderá ser causado pelo rejeito de mármore sintético, que levaria centenas de anos para se degradar na natureza. O número de ciclos de reaproveitamento também é um fator a ser observado,

pois, de acordo com a quantidade de vezes que o produto é reciclado, espera-se estabelecer uma relação entre o peso específico do mármore sintético reciclado e o número de ciclos de reaproveitamento do mármore sintético como carga. Adicionalmente, também será investigado o comportamento mecânico do mármore sintético, para que se possa estabelecer a variação da resistência à flexão em compósitos de matriz de resina poliéster, com diferentes porcentagens de adição de carga reciclada.

A incorporação em múltiplas etapas de reciclagem (i.e., moer e reciclar novamente o material já reciclado anteriormente), poderá eventualmente conferir menor fragilidade à peça uma vez que aumenta o teor de polímeros no produto final. Segundo Mano, 1991, os componentes de um compósito atuam de forma conjunta, e as propriedades do conjunto são superiores à de cada componente individual. A resina poliéster utilizada para produção de mármore sintético possui uma resistência à flexão maior que o mármore sintético, e incorpora à pedra sintéticas melhores limites de resistência à flexão como pode-se observar em relação à pedra natural, Rabahi et al, (2007) e Souza et al, (2008).

## **1.2 - ASPECTOS DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO MÁRMORE SINTÉTICO**

O presente trabalho aborda novas variações de produção de pedras sintéticas, a partir de matérias primas provindas de processo de reaproveitamento de resíduos industriais de pedras naturais e sintéticas, como forma de solução para os descartes destes respectivos rejeitos. Adicionalmente, realiza a análise estatística da resistência mecânica à flexão, tanto de vigas de mármore sintético, a partir de matéria prima virgem, como também de vigas com a substituição gradual do componente de carga mineral por um componente obtido a partir do reaproveitamento do mármore sintético e rejeitos de vários tipos de pedras naturais, provindos de descarte industrial. Esta substituição envolve a alteração em processos na cadeia produtiva e também possibilita o retorno do produto final já utilizado pelo consumidor final, permitindo assim, uma reciclagem completa do produto em questão.

Portanto, observa-se que, além do apelo ecológico, reutilizando mármore sintético e outros resíduos semelhantes, como matéria prima, o estudo proposto pode surtir efeitos de grande importância dentro do processo produtivo de mármore sintético e granito sintético, que, apesar de não ser um produto novo no campo industrial e comercial, possui poucos trabalhos científicos publicados, principalmente no que concerne à fratura,

confiabilidade e comportamento mecânico destes materiais, marcando portanto a grande importância do estudo em questão.

Ao avaliar o desempenho quanto à resistência e rigidez à flexão, será possível um melhor conhecimento de aspectos da fratura deste tipo de material, do módulo de elasticidade, da repetibilidade da tensão de ruptura dos mesmos (quantificada pelo módulo de Weibull, Argyrou, (2015)). Assim como uma avaliação da economia obtida no custo final da matéria prima, que poderá justificar, ou não, o aumento de custo relativo ao retorno das peças já utilizadas pelo consumidor, bem como o reaproveitamento de peças defeituosas geradas dentro do processo produtivo normal.

Dentre as inúmeras aplicações de pedras sintéticas destaca-se uma aplicação importante, com reflexo direto na qualidade de vida das pessoas, em cozinhas, hospitais e centros cirúrgicos, onde os lavatórios e bancadas não podem conter porosidade excessiva, emendas, frestas ou cantos vivos, sendo a assepsia e segurança prejudicadas. A Pedra Sintética, com sua facilidade de modelagem, atende de maneira eficiente a essa exigência, Rabahi, (2010). Nestas e nas demais aplicações citadas anteriormente, por serem as pedras sintéticas materiais tipicamente frágeis, é necessário, dentre outras variáveis, conhecer o módulo de Weibull da tensão de ruptura das mesmas. Neste contexto, uma abordagem que permite quantificar este parâmetro é a estatística da fratura frágil de Weibull, Askeland, (2008). Assim, um dos objetivos deste trabalho envolverá a determinação do módulo de Weibull de diferentes composições de pedras sintéticas.

O módulo de Weibull, que é um reflexo da repetibilidade do material, tem importância fundamental nas propriedades finais do produto, uma vez que tanto no transporte e instalação, quanto no uso diário pelo consumidor essas peças estão sujeitas a solicitações mecânicas que podem comprometer a vida útil do produto. Resultados muito dispersos requerem um fator de segurança maior e consequentemente maior custo efetivo. Assim, a utilização do método estatístico de Weibull, com número adequado de Corpos de Prova (CPs), é fundamental para determinação da variabilidade da tensão de ruptura. Adicionalmente, este método também permite que se determine a Resistência Intrínseca, do material Askeland, (2008).

Segundo Silveira (2006), a avaliação de Weibull possui vantagens em relação à Distribuição Normal por necessitar em torno de 30 corpos de prova, quando a segunda precisa de pelo menos 100, para obtenção da mesma confiabilidade, em análise de ruptura

de materiais frágeis. Ainda segundo este estudo, na previsão através da Distribuição Normal acontece falha do material sem carga, sendo que este método não é indicado para tratar os dados de tensão de ruptura de materiais frágeis.

### **1.3 - HIPÓTESE A COMPROVAR**

Em relação aos mármore sintéticos convencionais já consolidados no mercado (i.e., compósitos de matriz de resina poliéster com carga de pedra natural), este trabalho se propõem a investigar a hipótese que se segue. É possível criar e desenvolver um novo tipo de mármore sintético (i.e., incorporando diferentes quantidades de carga mineral reciclada de primeira, segunda e terceira gerações), que apresente resistência mecânica equivalente ou superior, em relação ao material convencional, bem como seja de fabricação viável e incorpore alguma outra característica atrativa ao meio ambiente, e no que concerne a outros aspectos do comportamento mecânico e ao mercado?

### **1.4 - OBJETIVOS DO TRABALHO**

Tendo em vista a escassez de trabalhos técnico-científicos que quantificam propriedades mecânicas importantes de pedras sintéticas, com diferentes proporções de carga de material reciclado, os principais objetivos deste trabalho são:

- Obter parâmetros reais e compatíveis com o processo de fabricação do mármore sintético, que possam subsidiar a comparação das diversas composições estudadas, dentro das mesmas condições, para prospectar a viabilidade da sua reciclagem e verificar a repetibilidade e o valor intrínseco das tensões de ruptura;
- Conhecer propriedades e características de novos materiais com o reaproveitamento de resíduos diminuindo assim o impacto ambiental que esses produtos possam provocar quando descartados; e também, adicionalmente evitar a extração de matéria prima mineral, utilizada na fabricação destes produtos; e
- Verificar se é possível, ou não, explorar as propriedades que possam ser fator diferencial atrativo na comparação com produtos convencionais, gerando assim relações profícuas de viabilidade econômicas para possibilitar a aplicação real deste estudo;
- Avaliar métodos e normas que possam ser instrumentos de análise deste trabalho e de estudos futuros, tendo parâmetros comparativos que correlacionam seus resultados, permitindo assim gerar subsídios para padronizações e normatizações

desses produtos e processos, como forma de se obter um melhoramento constante através de estudos científicos; e

- Verificar se há alguma relação entre o coeficiente de variação (quociente do desvio padrão sobre a média) dos experimentos e o módulo de Weibull ( $m$ ) dos novos materiais investigados.

## **1.5 - ESTRUTURA DA TESE**

No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito dos assuntos mais importantes que tem relação direta com o desenvolvimento desta Tese de Doutorado. A metodologia experimental e teórica é apresentada no Capítulo 3, e os resultados obtidos estão expostos no Capítulo 4. No Capítulo 5 é feita a discussão e a análise dos resultados, e, em seguida, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros no Capítulo 6.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 - ASPECTOS GERAIS

Para se avaliar a resistência mecânica à flexão da Pedra Sintética com segurança, tendo em vista sua significativa variabilidade, é necessário empregar uma abordagem estatística compatível; e aplica-la na análise dos resultados experimentais obtidos. A ocorrência de descontinuidades, tais como impurezas, microfissuras e vazios, é um fator de grande influência nas propriedades mecânicas de materiais compósitos frágeis, principalmente a tensão de ruptura, e esta influência ocorre de acordo com o tamanho, forma, disposição e da quantidade destas descontinuidades, Silveira (2006).

Na Pedra Sintética, que tem em seu processo produtivo a mistura de sua massa, provocando a formação de bolhas, faz-se necessário que a sua moldagem ocorra em mesas vibratórias e ou a utilização de sistemas a vácuo, para eliminar boa parte desses vazios e facilitar o escoamento da massa pelo molde, que pode ser fechado ou aberto. Quando não se emprega o processo a vácuo, que é um fator de aumento de custo de produção, mesmo após o processo vibratório, observa-se ainda grande formação de bolhas tanto microscópicas quanto macroscópicas, LEE et al (2008).

A resistência mecânica do mármore sintético é fortemente influenciada pela probabilidade de se encontrar essas descontinuidades em um volume de referência fixo. Em materiais metálicos ou poliméricos termoplásticos (para  $T_{amb} > T_g$ ), que apresentam grande deformação plástica, o comprometimento de sua resistência mecânica é comparativamente menor em relação aos materiais frágeis. *Nos materiais tipicamente dúcteis, a dispersão estatística da resistência mecânica é relativamente pequena e obedece a uma distribuição Gaussiana* Askeland, (2008). Por outro lado, a resistência mecânica de materiais frágeis, como o mármore sintético investigado neste trabalho, apresenta grandes variações de resultados em corpos de prova idênticos e de mesma composição, mas com teores de descontinuidades diferentes, em função de seu processo produtivo. Assim, pode-se sugerir que uma das avaliações utilizadas para análise de confiabilidade do mármore sintético seja a distribuição estatística de Weibull, já que se trata de um estudo que modela bem, tanto o valor intrínseco quanto a dispersão da resistência de materiais frágeis, resultante da aleatoriedade dos tamanhos, formas, disposição e quantidades destas descontinuidades, Rabahi et al., (2007).

A inserção gradual de produto reciclado na matriz polimérica deverá provocar uma diminuição na densidade do produto final, uma vez que o mármore sintético tem menor densidade que a carga que será substituída. O tempo de desmoldagem, conforme Rabahi, (2010), também influencia fortemente o módulo de Weibull, que quantifica a repetibilidade da tensão de ruptura dos materiais (Lu et al., 2002), devendo também sofrer alguma influência com o processo de reciclagem, em função de possível diminuição da fragilidade do material; caso haja influência favorável poderá ser fator importante na viabilização do processo de reciclagem, uma vez que o tempo de desmoldagem no processo de produção influencia fortemente no número de vezes que os moldes podem ser utilizados durante um dia, tendo influência direta na produtividade por molde.

Como já adotado em várias investigações anteriores, na análise dos resultados experimentais obtidos de tensões de ruptura em ensaios destrutivos de flexão de materiais frágeis, neste estudo também será aplicada a estatística de Weibull. E, caso haja necessidade, pode-se incluir outras análises apropriadas, como por exemplo a distribuição Normal. Em alguns trabalhos foram comparadas as análises de dados feitas através de métodos estatísticos diferentes, como na investigação realizada por Lu et al. (2002). O trabalho de Lu et al mostra uma comparação entre as distribuições Normal e de Weibull, em diferentes tipos de materiais frágeis, tais como  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , SiC e ZnO, quando aplicadas aos resultados experimentais. Sendo que, segundo o critério de informação Akaike (critério proposto por Akaike, H. em 1969 para comparar análises estatísticas entre si), na análise do  $\text{Si}_3\text{N}_4$  a distribuição de Weibull obteve um resultado mais satisfatório. Já o SiC, teve resultados semelhantes em ambas análises, sendo o ZnO melhor analisado pela distribuição Normal. Assim, a metodologia de Weibull viabiliza esta análise, uma vez que, além dos corpos de prova possuírem grande semelhança dimensional de espessura com os produtos fabricados em mármore sintético, eles estão sujeitos à ocorrência de imperfeições devido ao processo de fabricação, tendo assim características de materiais frágeis.

## **2.2 - ENSAIOS DESTRUTIVOS DE FLEXÃO**

Segundo Chamis (1974), há várias razões interessantes para que o teste de flexão de três pontos seja usado extensivamente na caracterização de materiais: economia, simplicidade de preparação de amostras e testes, facilidade de adaptação, adequação para aplicação solicitações mecânicas, conveniência para os estudos de tenacidade à fratura, e a

disponibilidade de fórmulas simples bem documentados para a análise de materiais estruturais. Outra razão importante é que o teste de flexão de três pontos é uma maneira simples de submeter um espécime a tensão, compressão e cisalhamento transversal, simultaneamente. Neste sentido, um ensaio de três pontos proporciona uma medida direta da integridade estrutural do material, submetido a diferentes esforços combinados (tração, compressão e cortante).

A Tensão normal máxima devido á flexão (ou módulo de ruptura em flexão),  $\sigma_{max}$ , obtido a partir do cálculo das tensões máximas de ruptura, que segundo Nash (1998), e dado pela equação (2.1):

$$\sigma_{max} = \frac{M_f \cdot y}{I} \quad (2.1)$$

Onde:

$\sigma_{max}$  é a tensão normal máxima devido à flexão;

$M_f$  é o momento fletor máximo  $(P/2) * (L/2)$ ;

$y = t/2$  é a metade da altura da secção transversal do CP;

$I$  é o momento de inércia da área da secção transversal do CP.

$P$  é a carga aplicada

$L$  é a distância entre apoios

A partir da equação (2.1), chega-se então à equação (2.2), que descreve a Tensão máxima de ruptura, sendo adotada como  $\sigma$ , em função das variáveis que podem ser obtidas através do experimento, quais sejam: a força ( $P$ ), as dimensões, distância entre apoios ( $L$ ), espessura ( $t$ ), largura do CP ( $b$ ) e a deflexão ( $f$ ), conforme ilustrado na Figura (2.1).

$$\sigma = \frac{M_f \cdot \frac{t}{2}}{\frac{b \cdot t^3}{12}} = \frac{\frac{P \cdot L}{4} \cdot \frac{t}{2}}{\frac{b \cdot t^3}{12}} = \frac{3}{2} \frac{P \cdot L}{b \cdot t^2} \quad (2.2)$$

Askeland et al, (2011), descreve a análise de flexão de três pontos para materiais frágeis com as figuras 2.1(a) e 2.1(b):

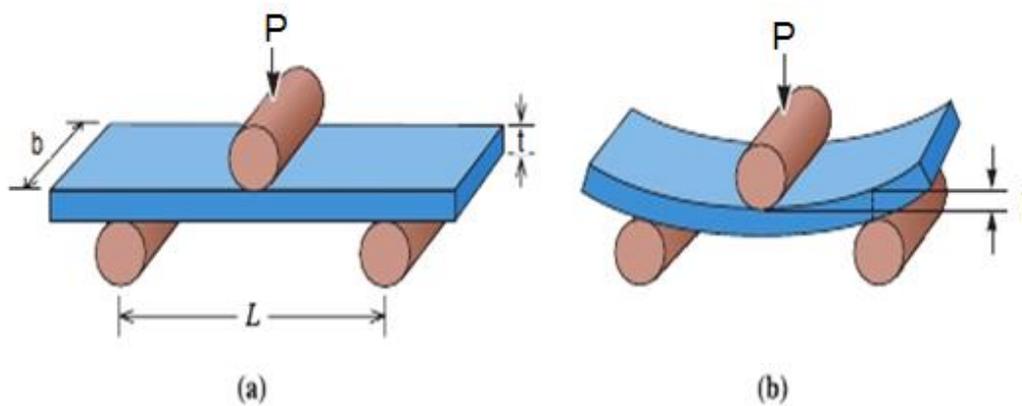


Figura 2. 1 - (a) O teste de flexão de três pontos (b) a deflexão após aplicação da carga, adaptado de Askland et al, (2011)

A flecha ou deflexão ( $f$ ), pode ser utilizada para obtenção do módulo de elasticidade  $E$  do material, a partir da equação (2.3), Askland et al, (2011). Observando que, via de regra, materiais dúcteis sofrem um dobramento significativo, e materiais frágeis fraturam mesmo com pequenas curvaturas. Basicamente, os valores fornecidos pelo equipamento durante o ensaio são: a carga aplicada ( $P$ ); o deslocamento vertical ou deflexão ( $f$ ) e o tempo em segundos. Para o cálculo do módulo de elasticidade ( $E$ ), e assumindo-se que os CPs têm seções retangulares constantes, i.e., são prismáticos, estes foram obtidos inserindo-se uma coluna na planilha eletrônica com a formulação abaixo, isolando-se o valor de ' $E$ ' (Nash, 1992).

$$f = \frac{P.L^3}{48.E.I} \quad (2.3)$$

Onde:

- $f$  é o valor da deflexão, no ponto de aplicação da carga;
- $P$  é a carga aplicada;
- $L$  é o comprimento entre os apoios (Vão, Figura (3.16));
- $E$  é o módulo de elasticidade em flexão; e
- $I$  é o momento de inércia de área da secção transversal do CP ( $b.t^3/12$ )

Pode-se ainda, da equação 2.3, obter-se a seguinte expressão para cálculo do módulo de elasticidade em flexão efetivo em flexão, de acordo com Nash, (1992):

$$E = \frac{P.L^3}{48.f.I} \quad (2.4)$$

Onde  $f$  é a deflexão máxima (flecha, no ponto médio  $L/2$ , medida a partir da configuração não deformada) da viga e  $P$  é a força aplicada, conforme ilustrado na Figura (2.1).

Após o desenvolvimento da equação (2.4), como  $I = (b.t^3)/12$ , pode-se escrever a equação (2.5)

$$E = \frac{P.L^3}{4.f.b.t^3} \quad (2.5)$$

Segundo Frischholz (2004), devido à inerente distorção de peças produzidas com pequenos desalinhamentos entre as arestas e à falta de planicidade que as mesmas podem apresentar, bem como para minimizar o escorregamento e as forças de atrito da peça com os apoios, são previstos, em ensaios de flexão de três ou de quatro pontos, dois graus de liberdade rotacionais em torno do eixo longitudinal. Um referente a um dos apoios e outro ao aplicador de carga, conforme ilustrado na Figura 2.2. Este tipo de adaptação permite validar experimentos nos quais articulações no dispositivo de ensaio sejam necessárias para que o mesmo possa adequar-se às irregularidades do corpo de prova, oriundas do processo de fabricação. Ainda segundo Frischholz (2004), os graus de liberdade apresentados na Figura 2.2 (em um dos suportes e no aplicador de carga) além de minimizarem a influência de atrito sobre a medição, asseguraram a aplicação uniforme da força sobre a peça de teste.

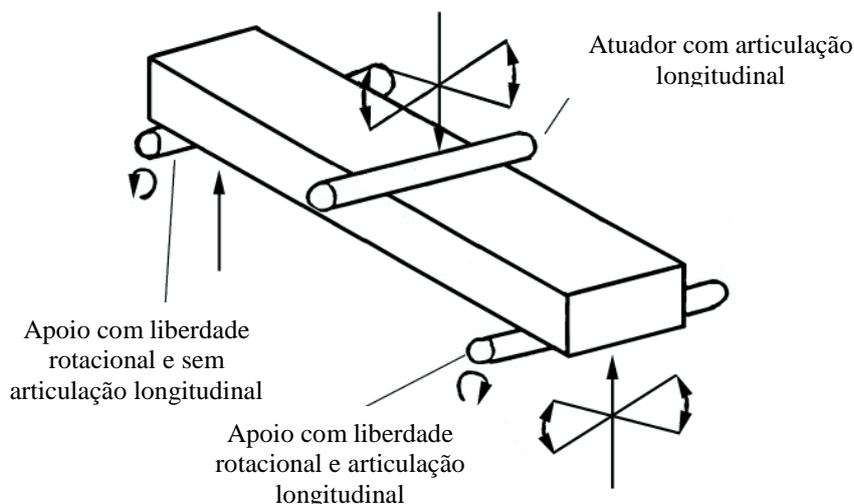


Figura 2. 2 - Ilustração esquemática de suporte articulado, segundo Frischholz (2004)

### 2.3 - ESTATÍSTICA DA FRATURA FRÁGIL

Estudos em diversas áreas utilizam o método estatístico de Weibull como ferramenta de análise para medir confiabilidade e estabelecer parâmetros críticos de possíveis falhas, baseando-se em tipos e frequências de ocorrências e ou falhas, como mostrado em Santos (2008), que propõe a análise como forma de melhor controle de fluxo de produtos (Engenharia de Produção), tendo como base de dados resultados de assistência técnica realizada por empresas de manutenção em produtos dentro e fora de garantia.

A aplicabilidade da estatística de Weibull abrange várias áreas, tendo como objetivos a melhor aproximação matemática em relação a uma variável ensaiada, e a quantificação de seu valor intrínseco ou característico (neste trabalho relacionado à resistência média dos resultados obtidos, conforme detalhado a seguir), e do grau de sua variabilidade (quantificada pelo parâmetro  $m$ ). Esta aproximação pode ocorrer com outros modelos de análise, como a distribuição normal dentre outras. Em uma análise de ruptura por compressão de concreto, por exemplo, Colman et al (2014), concluíram que entre as análises de Weibull e Normal, a primeira permite uma melhor aproximação dos resultados referentes a ensaios destrutivos, e conseqüentemente apresenta melhor confiabilidade para este tipo de material (concreto), que tem características de material frágil.

A análise de propriedades mecânicas como tensão de ruptura e sua variabilidade, bem como o módulo de elasticidade são parâmetros importantíssimos na caracterização de novos produtos. Principalmente no fator comparativo da substituição de materiais já existentes por outros alternativos, que é a fundamentação deste trabalho. Tais parâmetros também são relevantes no trabalho “Edge chipping resistance and flexural strength of polymer infiltrated ceramic network and resin nano ceramic materials”, Argyrou (2015), que avalia o desempenho de novos materiais de nanotecnologia em compósitos, através da análise dos resultados produzidos pela estatística de Weibull.

O índice de confiabilidade obtido em um levantamento estatístico de Weibull, e seu módulo  $m$ , relacionado com a repetibilidade da tensão de ruptura de materiais estruturais, permitem estabelecer previsões de probabilidade de falha (ou sobrevivência) de um material submetido a uma tensão conhecida, tempo de vida útil e velocidade de propagação de trincas, quando se conhece os condicionantes do regime de trabalho, tornando possível a avaliação de variações de composições da matéria prima, bem como de processos produtivos, como os que serão apresentados neste trabalho, e é mostrado em “Effect of fiber addition on slow crack growth of a dental porcelain”, Araújo, et al, (2015).

Quando se analisa um conjunto de dados dispersos por uma condição de fragilidade do material, essa dispersão poderá provocar a diminuição na confiabilidade do material, quão maior for essa dispersão. Segundo Pardini e Manhani (2002), a distribuição de Weibull é a ferramenta estatística mais utilizada para lidar com características de variabilidade nas propriedades mecânicas, provocada por fissuras, vazios e impurezas de compósitos

estruturais e reforços fibrosos. No estudo, os autores investigam a influência do comprimento da fibra sobre a Tensão, o módulo de Young e o módulo de Weibull de fibras de carbono e fibras de vidro. Pardini e Manhani, (2002), ainda citam que o módulo de Weibull pode ser uma ferramenta para avaliar a homogeneidade das fibras em termos de propriedades, podendo ser ainda um parâmetro de controle de qualidade durante o processamento.

Segundo Askeland e Phulé, (2008), em termos matemáticos, “pode-se mostrar que a probabilidade de sobrevivência dos corpos de prova  $P(V_0)$ , ou seja, a probabilidade de um material frágil, de volume  $V_0$ , não frature sob a tensão aplicada  $\sigma$  é dada pela equação (2.6)”:

$$P(V_0) = \exp \left[ - \left( \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (2.6)$$

Onde  $\sigma_0$  é a resistência intrínseca ou característica, e a tensão  $\sigma_u$  associada à  $P(V_0) = 1$ , ou seja, a tensão na qual a probabilidade de sobrevivência é de 100%, ou a de falha,  $F(V_0)$ , igual a 0. Em muitos casos, principalmente ao se tratar com materiais frágeis, pode-se desprezar  $\sigma_u$ . (i.e. adotar-se que  $\sigma_u=0$ ).

Seguindo o mesmo raciocínio pode-se ainda escrever que a probabilidade de falha,  $F(V_0)$  é dada por:

$$F(V_0) = 1 - P(V_0). \quad (2.7)$$

Para este trabalho onde os corpos de prova se comportam como materiais tipicamente frágeis, já que possuem uma matriz de resina poliéster cuja deformação de ruptura varia de 2 a 5% (Daniel e Ishai, 2006), e existindo uma dispersão considerável nos valores correspondentes às tensões de ruptura, adota-se como valor seguro, quando não haverá falha no material testado, a tensão de ruptura onde a probabilidade de falha é nula,  $\sigma_u$ , igual a 0. Assim para esses materiais pode-se através da equação (2.6) encontrar a seguinte equação, Askeland (2008):

$$F(V_0) = 1 - P(V_0) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (2.8)$$

O expoente  $m$ , chamado de Módulo de Weibull, é adimensional e fornece uma avaliação da homogeneidade do material e, conseqüentemente, da repetibilidade de seus valores de resistência mecânica e, portanto, de sua confiabilidade estrutural. Quanto menor o módulo de Weibull, maior é a dispersão dos resultados, indicando o material mais susceptível a

falhas em uma maior faixa de tensões. Já para valores elevados do parâmetro, a dispersão torna-se menor em um estreito intervalo em torno de  $\sigma_0$ . Assim, quanto maior o  $m$ , maior é a confiabilidade do material, pois a dispersão das tensões de ruptura medidas é menor. À guisa de comparação, para um aço de baixo carbono recozido  $m = 100$ ; e para uma fibra de carbono típica (material estrutural que apresenta significativa dispersão da resistência à tração)  $m = 5$  (Hull e Clyne, 2005).

Após desenvolvimento da equação (2.8), o Modulo de Weibull pode ser determinado, para materiais frágeis, pela equação (2.9):

$$m = \frac{\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(V)}\right)\right)}{(\ln(\sigma) - \ln(\sigma_0))} \quad (2.9)$$

## 2.4 - MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

XU, et al. (2008), utiliza uma importante ferramenta de análise que estuda as distribuições de tensões, deformações e deslocamentos de variação contínua, em vigas de espessura variável, com uma extremidade engastada e a outra extremidade simplesmente apoiada, sob cargas estáticas. De acordo com as equações que governam o problema de estado plano de tensão, as expressões gerais de deslocamentos, que satisfazem as equações diferenciais que regem o comportamento mecânico e as condições de contorno nas extremidades da viga, pode ser deduzido. Comparando os resultados numéricos obtidos a partir do software Ansys, a solução obtida tem excelentes características de correlação e convergência.

No estudo desta tese, utiliza-se também como ferramenta a simulação numérica em elementos finitos, através do programa Ansys, Siqueira et al, (2009). Tanto para obtenção das deflexões, em particular a flecha ( $f$ , deslocamento máximo na flexão), bem como das distribuições de tensões e deformações e a visualização gráfica das mesmas. Neste trabalho, valores de tensão e flechas obtidos em simulações serão comparados com os observados nos ensaios experimentais. Esta análise se faz necessária em função da geometria irregular e variável dos corpos de prova (CPs), provocadas pelo processo de fabricação dos CPs através de moldagem em molde aberto (submetido a vibrações) por derramamento de massa. Em particular, a espessura dos CPs varia lateral e longitudinalmente.

Em termos práticos, os “softwares” de Elementos Finitos como o Ansys oferecem aos usuários uma biblioteca de elementos do programa. Esta, contendo diversos elementos, de distintas formas, cada qual tentando representar mais adequadamente uma configuração geométrica e uma diferente finalidade (barras, placas, cascas, membranas, sólidos 3-D, vigas, etc).

A partir da criação de uma malha de elementos finitos contendo elementos e nós, representando a discretização de um elemento estrutural, o comportamento no interior de cada elemento (campo de deslocamentos) é descrito por intermédio de “funções matemáticas” que descrevem a rigidez daquele elemento individual. Obtém-se então para um simples elemento de viga diversos componentes diferentes: rigidez axial, rigidez à flexão, ao cisalhamento, à torção, etc. A forma mais eficiente e viável de representar as características e calcular os deslocamentos nodais de um conjunto de elementos, associado a uma malha de elementos discretos é por intermédio da Álgebra Matricial. Cria-se então o conceito de matriz de Rigidez de cada elemento.

Assim como a rigidez de uma mola uniaxial é contabilizada por intermédio da relação força x deslocamento para a mesma, em um Elemento Finito a ideia é análoga, porém bem mais abrangente e complexa, tendo em vista que os diversos componentes de rigidez de um elemento estão relacionados aos diversos componentes de força e deslocamentos nodais presentes. Assim, constrói-se um modelo adequado da estrutura, a partir do conhecimento de como cada elemento trabalha. Neste contexto, o software monta e soluciona um sistema de equações associado à matriz de rigidez global da estrutura, a partir da matriz de rigidez de cada elemento. A matriz global, em última análise, contabiliza a rigidez da estrutura inteira, Alves, (2000)

Segundo Alves, (2000): *“Depois de montado o Modelo Estrutural, é determinada a Configuração Deformada da Estrutura no computador, por intermédio dos deslocamentos dos nós, qualquer que seja a forma da estrutura e o tipo de carregamento. É determinado então, o Estado de Tensões na Estrutura e conseqüentemente a avaliação de sua resistência mecânica”*. Além dos cálculos e a obtenção de valores numéricos, o programa Ansys permite a visualização gráfica das variáveis analisadas.

No presente trabalho é utilizado uma modelagem matemática de elementos finitos com elemento quadrilateral quadrático, com 6 graus de liberdade - deslocamentos em X, Y e Z e rotações em X, Y e Z (solid186), com número de 28657 nós, e 5760 elementos e calculado através do programa Ansys. Esta análise possibilita uma avaliação contínua das

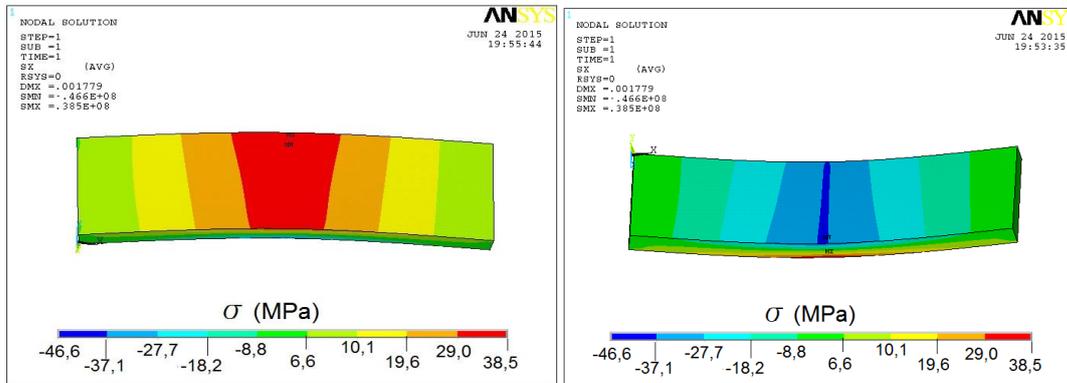


Figura 2. 3 - Simulação de carregamento de CP irregular na flexão de três pontos

distribuições de tensões normais ( $\sigma$ ) e deformações em todo CP, possibilitando a obtenção do módulo de elasticidade ( $E$ ) de forma discreta em cada ponto da malha, além de fornecer o deslocamento do ponto central (máximo), flecha ( $f$ ), o que possibilita simular um problema complexo, levando-se em consideração as irregularidades geométricas dos CPs (vigas bi apoiadas de seção aproximadamente trapezoidal e variável, submetidas a flexão de 3 pontos).

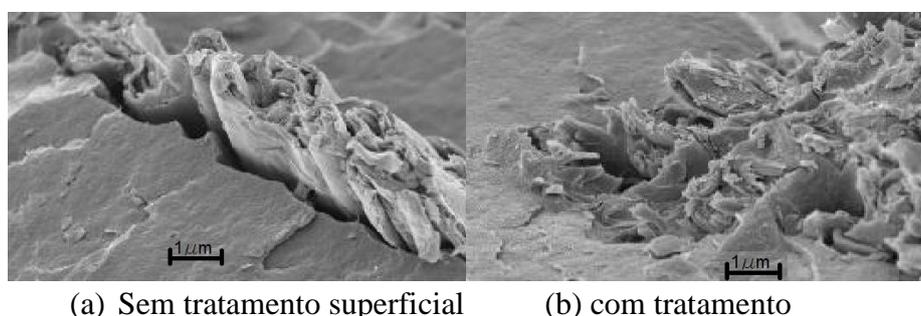
## 2.5 - ANÁLISE MICROGRAFICA (INTERFACE CARGA- POLÍMERO)

É ainda comum por parte das indústrias a utilização de cargas minerais de forma empírica, em misturas com os polímeros. O conhecimento das propriedades intrínsecas das cargas minerais e dos polímeros, bem como, da influência da tensão superficial na interação entre eles, ajudam no desenvolvimento de agentes de tratamento superficial visando melhorar a compatibilidade de energia entre a carga mineral e o polímero. A análise da interface entre polímero e carga mineral, contribui para um melhor entendimento e previsão das propriedades de compósitos e nano compósitos. As características físicas e químicas dos produtos destas misturas, como alongamento, tensão de ruptura à flexão, deformações ao calor, etc, são medidas e definidas, constatando-se modificações nestas propriedades quando comparadas com as mesmas propriedades para os polímeros puros, Lima (2007).

Ainda segundo Lima (2007), durante o processo de mistura entre a carga mineral e o polímero, devido à força de adesão entre as partículas minerais e à tensão interfacial entre partícula e polímero, as partículas de carga mineral podem tender a formar agregados. A presença de agregados é particularmente relevante quando da presença de partículas com granulação inferior a 20  $\mu\text{m}$  de diâmetro, situação em que as forças atrativas entre elas podem ser mais importantes que o seu próprio peso.

O tratamento superficial objetiva primeiramente o melhoramento da molhabilidade na carga mineral pelo polímero. Este tratamento promove a adequação de energias superficiais e a tensão superficial do polímero, que é geralmente baixa, e da carga mineral, que é geralmente mais elevada, são então compatibilizadas, e assim, a carga adsorve o polímero mais completamente e mais rapidamente, de acordo com Guillet (2003),

A partícula de carga mineral costuma ter a sua força de tensão superficial muito superior à do polímero. O tratamento adequado diminui a tensão superficial da carga mineral a valor menor que a tensão superficial do polímero, melhorando assim, a interação partícula-polímero permitindo que a carga se disperse mais facilmente na matriz do polímero, Lima (2007).



(a) Sem tratamento superficial      (b) com tratamento

Figura 2. 4 - Ação de tratamento superficial para melhoramento na interface carga - polímero, Turella et al, (2013)

Segundo Turella et al, (2013), a diferença das tensões superficiais, entre matriz e carga, pode provocar o descolamento do componente na matriz polimérica, isto pode ser observado nas Figuras (2.4 (a) e (b)), onde também pode ser ressaltado a ação de tratamentos superficiais na carga para obtenção de uma melhor interface.

### **3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL E TEÓRICA.**

#### **3.1 - MATERIAIS E CONFEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA**

##### **3.1.1 - Considerações Gerais**

Para alcançar o objetivo da pesquisa proposta, foram confeccionadas vigas de mármore sintético, de volume constante e com diferentes formulações, como corpos de prova (CPs) para execução de ensaios destrutivos. Estes proporcionarão dados para realização de análises estatísticas, nas quais serão obtidos os parâmetros necessários para as caracterizações do estudo, principalmente quanto à resistência mecânica e repetibilidade dos mesmos.

Este Trabalho propõe a execução de 19 grupos de amostras, com no mínimo 30 CPs por composição, através ensaios destrutivos com base na norma ASTM D-790-90 de flexão de materiais compósitos, utilizando a máquina universal de ensaios MTS 809. Esta norma regimenta um ensaio de flexão em três pontos (Figura 3.1). Para determinação das propriedades mecânicas, esse procedimento de ensaio é o método indicado: pela simplicidade da confecção dos corpos de prova (CPs); pela maior dificuldade de se executar ensaios de tração em materiais frágeis, devido ao possível deslizamento do CP nas garras da máquina de ensaio; e por melhor representar a condição real de fratura (em campo).



Figura 3. 1- Ensaio destrutivo de Flexão em três pontos, Rabahi, et al., (2007).

Ao se promover uma flexão aplicando uma força  $P$  no centro do CP ( $L/2$ ), conforme ilustrado na Figura 3.1, provoca-se, além do esforço cortante e da compressão na região superior, uma tensão de tração, que surge a partir da linha neutra e tem maior valor trativo na superfície inferior da amostra. Neste local, provavelmente, terá início a fratura dos CPs. Os valores máximos desta tensão normal de tração devido à flexão ( $\sigma_{\max}$ ), obtidos de cada ensaio destrutivo, sendo ordenados de forma crescente de  $\sigma_{\max}$  (i.e. do mais baixo ao mais elevado valor) para se calcular as probabilidades de falha de cada amostra, pelo método da posição relativa. E, em seguida, aplicar a estatística da fratura frágil de Weibull (1939).

Neste capítulo, são abordados os aspectos práticos e teóricos, a respeito das metodologias e materiais empregados nos experimentos, tendo como fundamentação, a similaridade de produção dos Corpos de Prova (CPs), em relação às peças produzidas comercialmente em mármore sintético. Esta similaridade se baseia na forma de produção, (o equipamento de mistura e o molde aberto são similares aos utilizados em indústria). Assim, em particular, a espessura dos CPs assemelha-se à espessura das peças produzidas, entre 6,00 mm e 9,00 mm. Outro importante aspecto que se deseja preservar, é a não execução de acabamento para regularização da espessura dos CPs, pois essa retirada de material superficial poderia interferir na reprodutibilidade do produto comercialmente trabalhado, uma vez que esse material não sofre nenhum acabamento superficial para regularização do mesmo. Adicionalmente, a usinagem poderia gerar defeitos micro estruturais na superfície dos CPs, os quais não existem nas peças comerciais, e interferir na resistência à flexão dos mesmos. No entanto, é proposto a execução de acabamento superficial em alguns CPs, com o objetivo de analisar essas possíveis alterações nas propriedades avaliadas por este trabalho, em relação aos que não receberam o mesmo tratamento.

No total, cerca de 900 vigas de mármore sintético, com diferentes formulações (19 ao todo), como corpos de prova (CPs), possuem variações de composição nos percentuais de materiais virgens e provindos de reaproveitamentos, seja de rejeitos de mármore sintético ou de indústrias de beneficiamento de pedras naturais e sintéticas, que transformam placas em peças.

Os materiais empregados neste trabalho consistem basicamente de uma matriz aglutinante, de resina poliéster insaturada tereftálica, cargas provindas de

reaproveitamento de pedras naturais e sintéticas, bem como cargas virgens providas diretamente de empresas extratoras de pedra calcária, carbonato de cálcio,  $\text{CaCO}_3$ . O mármore sintético puro reciclado e o resíduo de pedras naturais foram reduzidos por britagem e moagem e classificados em peneiras de malhas 20, 30, 50, 100 de forma separada, por se tratarem de origens diferentes e por possuírem percentuais diferentes de oferta. O mármore sintético pode ser considerado com um ciclo a mais de reaproveitamento, uma vez que no rejeito da pedra sintética existem percentuais significativos de elementos químicos, que interferem no processo de polimerização do novo material. Já nos rejeitos provindos de marmorarias, indústrias de beneficiamento de pedras, estes percentuais são imperceptíveis, uma vez que quase a totalidade das pedras beneficiadas são de origem natural. Esses índices são expostos durante o desenvolvimento do trabalho através de laudos e análises específicas de composição destes materiais.

### **3.1.2 - Materiais Utilizados**

Os compósitos sintéticos produzidos neste experimento utilizaram resinas poliéster insaturadas produzidas por dois fabricantes de resina, REICHHOLD e ASHLAND, com resinas apropriadas para produção de mármore sintético. A carga mineral de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) foi fornecida por empresa regional de extração mineral de calcário. A carga sintética reciclada é proveniente de peças defeituosas descartadas do processo de fabricação de mármore sintético e reaproveitada como carga. Da mesma forma, os rejeitos provenientes da empresa MARMORARTE de peças ornamentais e funcionais, a partir de placas de pedras naturais e sintéticas.

Um fator de grande importância é a equidade de processamento das formulações das diversas composições possíveis a serem trabalhadas. São observados percentuais de participação de cargas recicladas x cargas virgens, tendo essas variações de 10% em 10%, partindo do material com 100% de carga virgem até o produto com 100% de carga reaproveitada. A equidade é baseada na obtenção de uma massa com consistência que torna viável sua moldagem em moldes abertos e submetidos a uma vibração constante por cerca de 8 a 10 minutos, com tempos suficientes de mixagem e moldagem.

Serão realizados testes com as formulações primárias e puras nas mesmas proporções com todos três tipos de cargas: (i) carga mineral virgem (Calcário); (ii) carga mineral de rejeitos (material misto de várias pedras); e (iii) carga obtida a partir do mármore sintético. Ao se determinar granulometrias adequadas aos três tipos de cargas, simultaneamente e

com resultados satisfatórios de processamento industrial, pode-se, a partir dessa equidade de composições, atribuir as possíveis variações das propriedades mecânicas estudadas, principalmente às variações de cargas propostas neste trabalho.

Serão testadas algumas possíveis formulações, para que haja compatibilidade das granulometrias utilizadas em todas as formulações que serão analisadas. Tais granulometrias incluirão na padronização de malhas segundo classificação da ASTM E-11-87, conforme detalhado na Tabela (3.1).

Tabela 3. 1 - Adaptado da norma ASTM E 11 87

<b>Designação da Malha da Peneira</b>	
<b>Abertura, Microns [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Designação Alternativa</b>
850	No. 20
600	No. 30
425	No. 40
300	No. 50
250	No. 60
150	No. 100
75	No. 200

São utilizados quatro diferentes tipos de malhas correspondendo com à norma citada na Tabela 3.1, são elas:

- Peneira em aço Inox - ASTM 100 - MESH/TYLER 100 - Abertura 0,150mm
- Peneira em aço Inox - ASTM 50 - MESH/TYLER 48 - Abertura 0,300mm
- Peneira em aço Inox - ASTM 30 - MESH/TYLER 28 - Abertura 0,600mm
- Peneira em aço Inox - ASTM 20 - MESH/TYLER 20 - Abertura 0,850mm

Após o recolhimento dos rejeitos naturais e sintéticos, realiza-se uma classificação simples com intuito de separar alguns pedaços de rejeitos de pedra natural, que contenham malhas de fibra de vidro impregnadas na superfície inferior da placa. Esse cuidado é para evitar a presença de fibra de vidro na composição dos rejeitos que poderia, conforme estudo realizado por Rabahi (2010), interferir nos resultados, e conseqüentemente invalidar a comparação entre as materiais primas estudadas. Após esta classificação, em torno de 100 kg de rejeitos, o material está pronto para processamento e redução nas granulometrias desejadas.



Figura 3. 2 (a) - Rejeitos de rocha natural    Figura 3. 2 (b) - Rejeito de pedras sintéticas

O processo de obtenção dessas granulometrias inicia-se com redução do tamanho das pedras, sejam naturais ou sintéticas, ao volume compatível com a capacidade, em primeiro momento do britador, conforme pode ser observado pelas Figuras (3.2(a) e (b)). Após essa redução, esses produtos são processados por um moinho DM 200 de 1500W velocidade de funcionamento de 520 rpm, que diminui a granulometria a nível de peneiramento conforme as Figuras (3.3 (a) e (b)).



Figura 3. 3 (a) - Rejeito pós Britado    Figura 3. 3 (b) - Rejeito pós moinho

A partir desse estágio, inicia-se a classificação de todas as matérias primas a serem estudadas, inclusive a carga virgem, proveniente de processo classificatório na empresa fornecedora. Contudo, para garantir o mesmo padrão de granulometria, também é submetido ao peneiramento malhas de 20 a 100, conforme as Figuras (3.4 (a), (b)).



Figura 3.4 - (a) Peneira ASTM 20 - Mesh/Tyler - 20



Figura 3.4 - (b) Peneira ASTM 30 - Mesh/Tyler - 28

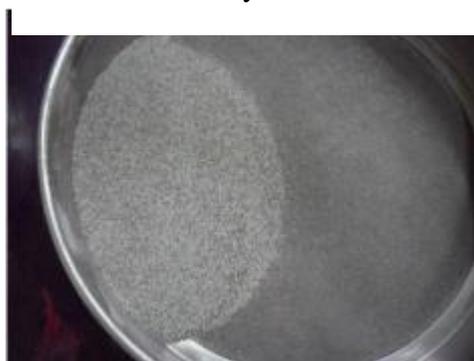


Figura 3.4 - (c) Peneira ASTM 50 - Mesh/Tyler - 48



Figura 3.4 - (d) Material passante na Peneira ASTM 100 - Mesh/Tyler - 100

A escolha das granulometrias é voltada para Produção em escala industrial, para o melhor aproveitamento das proporções produzidas por esses processos. Neste trabalho, esta opção inicial é mantida também por preservar as proporções entre si das quantidades com frações iguais. O restante dos componentes químicos e materiais de consumo utilizados no processo de fabricação são provenientes de distribuidores das respectivas fábricas, que por se tratarem de quantidades pequenas foram adquiridos em lojas de distribuição, são eles:

- Catalizador - Akzo Nobel - Metil-Etil-Cetona
- Desmoldante líquido - Redelease - Álcool polivinílico
- Desmoldante Cera - Redelease - Cera com carnaúba

Para fins de avaliação e comparação com os resultados obtidos nos ensaios, foram solicitados os boletins técnicos das duas resinas poliéster. Segundo o fabricante ASHLAND, através do boletim em anexo, a resina 3.7 (anexo A, Tabela a.1) possui uma tensão de ruptura média, em ensaio de flexão, em torno de 82 MPa. E, de acordo com o fabricante REICHHOLD, a resina POLYLITE® 32135-00 (anexo A, Tabela a.2) possui

uma tensão de ruptura em flexão, segundo a norma ASTM 790-D, de 103,4 MPa. Tais resinas possuem ainda Módulos de Elasticidade de 2,48 GPa e 4,13 GPa, respectivamente.

Ao se adicionar o carbonato de cálcio, com a intenção de aumentar o volume do produto e diminuir custo, na proporção de 25% de resina poliéster Arazyn 3.7 e 75% de carbonato de cálcio, por peso, obtendo-se o mármore sintético, a tensão de ruptura em flexão diminui em relação à resistência da resina pura. E, em ensaios de flexão em 3 pontos, varia entre 28 e 35 MPa (Rabahi, 2010), para o mármore sintético puro fabricado a partir de matéria prima virgem. É de certa forma previsível que haja uma considerável perda na tensão de ruptura com a adição de carga, uma vez que ocorre uma interferência deste componente, que atua como um defeito concentrador de tensões na matriz polimérica. Em contrapartida, em vigas de mesmo comprimento e largura, há um ganho de espessura ( $t$ ) e consequentemente no momento de inércia de área na secção transversal (que é proporcional a  $t^3$ ), a um incremento no custo muito baixo (o carbonato de cálcio é bem mais barato que a resina poliéster).

Com a adição de compósito reciclado proveniente do mármore sintético, pode haver uma redução da fragilidade da peça, uma vez que o percentual de poliéster presente no novo compósito será maior podendo alcançar até 45% de poliéster, por peso, já no primeiro ciclo de reciclagem. Esse teor será tão maior quanto forem os percentuais de resina utilizados em ciclos anteriores. Já com a adição de rejeitos processados de marmorarias, pode se esperar no primeiro ciclo de reciclagem, valores semelhantes de propriedades mecânicas avaliadas na flexão, uma vez que o percentual de resina poliéster no compósito final será próximo ao do mármore sintético de primeiro ciclo.

Define-se neste trabalho como sendo Mármore Sintético de “calcário”, o proveniente de carga mineral sem polímeros. E, de “primeiro ciclo”, o que utiliza a pedra sintética fabricada com calcário puro reciclada como carga processada por britagem e moagem, e classificada na granulometria adequada para utilização como matéria prima. E, assim, sucessivamente com os ciclos subsequentes. Em relação aos que utilizam rejeitos de marmorarias, a primeira produção já é chamada de “primeiro ciclo” de reciclagem, tendo em vista que se trata de resíduo sólido já descartado pela indústria de beneficiamento de pedras. Essa classificação de ciclos será de fundamental importância para a análise das propriedades mecânicas estudadas, tensão de ruptura  $\sigma_{\max}$  (MPa) devido à flexão, e Módulo de Elasticidade devido à Flexão  $E$  (GPa).

Além da Resina, que participa como matriz do compósito estudado, e a carga com as variedades já discriminadas anteriormente, o mármore sintético possui ainda um componente que merece relevância neste estudo por sua utilização alterada na medida que se utiliza carga reaproveitada, trata-se do catalizador responsável pela polimerização final da resina termofixa do compósito, o MEK (Metil Etil Cetona). É esperado que esse componente, por não participar da reação química se ligando às macromoléculas do polímero, tenha uma ação residual quando processado como carga e em contato novamente com um polímero não catalisado, esse efeito deverá ser quantificado no processo de fabricação para que se obtenha o mesmo tempo de catálise do compósito de primeiro ciclo.

Dos participantes do compósito em questão os principais já foram qualificados acima, alguns aditivos, corantes e pigmentos não serão empregados ou não terão suas formulações variadas durante o processo de fabricação dos Corpos de Prova (CPs).

### **3.1.3 - Preparação do molde**

No processo de moldagem do mármore sintético obtém-se o produto a partir de moldes normalmente de fibra de vidro, com formato final para utilização do produto. Os CPs deste trabalho foram obtidos a partir de molde com 5 peças de 1,0 m de comprimento x 40,0 mm de largura e 8,0 mm de espessura nominal, conforme Figura (3.5).

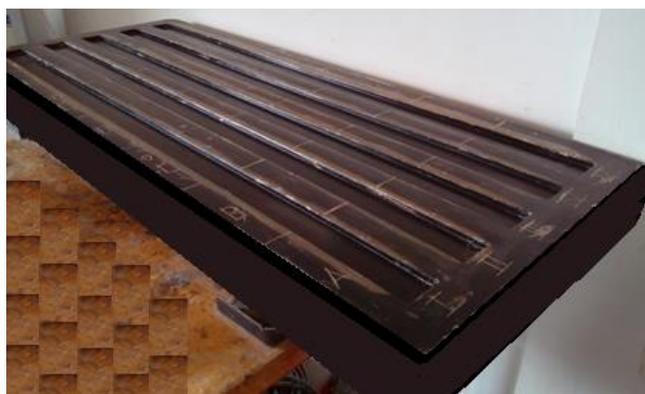


Figura 3. 5 - Molde em fibra de vidro para confecção dos CPs

Recomenda-se em moldagem com molde único inteiriço tipo fêmea e expulsivo, que o projeto tenha angulação de saída (ou ângulo de desmoldagem) positiva ou neutra, ou seja, o molde não deve, após a cura do material, oferecer resistência para o destacamento dos CPs (Lima e Holzmann, 2012). Levando-se em consideração à pequena espessura, relativamente ao comprimento, e o potencial de contração na polimerização, adotou-se

um ângulo neutro com a intenção de se obter sessões mais retangulares possíveis, conforme Figura (3.6).

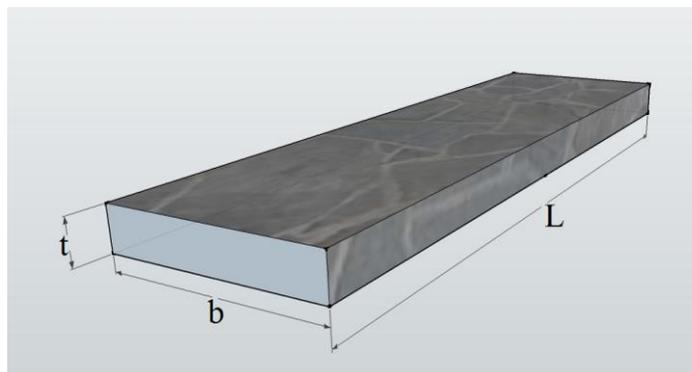


Figura 3. 6 - Modelo de CP adotado

A desmoldagem deve ser precedida de uma preparação do molde antes da moldagem e vibração, que consiste em eliminar ao máximo, a porosidade da superfície do molde, através de ceras desmoldantes e filmes obtidos através de desmoldantes líquidos como álcool polivinílico (PVA), que ao ser aplicado facilita a evaporação do líquido volátil, criando a partir de então um filme plástico com alto poder de desmoldagem. Outros processos de desmoldagem são utilizados nos processos produtivos industriais, como desmoldantes semipermanentes, ceras e líquidos de aplicação única e múltiplas desmoldagens, porém neste estudo, em função das características de ângulo de saída neutro no molde, e principalmente a não necessidade de se obter grande produtividade no processo de análise, o desmoldante PVA é o mais indicado, juntamente com aplicação prévia de cera a base de carnaúba.

### 3.1.4 - Confeção dos Corpos de Prova (CPs)

O processo de mixagem dos componentes merece uma atenção especial pois é nessa etapa que se define a qualidade da massa a ser moldada com melhor ou pior nível de “molhamento” das cargas, esse molhamento consiste na impregnação do material polimérico de forma homogênea na carga, e é através dessa característica que se obtêm melhoramentos na fluidez da massa no molde e até mesmo maior facilidade de expulsão das bolhas formadas no processo de mixagem.

A mixagem será realizada em batedeira planetária com capacidade para misturar 10 kg de massa, porém de acordo com a dimensão do molde que será utilizado neste estudo, será mixado 3,5 Kg de massa por grupo de CPs, cada grupo com formulação específica, mantendo-se, no entanto, as granulometrias pré-estabelecidas. O equipamento utilizado é mostrado na Figura 3.7.



Figura 3. 7 - Masseur planetária utilizada também em panificação.

O tempo de mistura foi determinado de acordo com o tempo médio de secagem da resina já misturada à carga, este tempo a uma temperatura entre 25°C e 30°C, deverá variar entre 20min e 25min, de acordo com as instruções do fabricante e as práticas adotadas e aperfeiçoadas na empresa. Assim, serão destinados 6 min para mistura total da massa 5 min para colocação da massa no molde e mais 8 min de vibração. Poderá haver alguma variação no índice de catalise, caso a temperatura extrapole os parâmetros de segurança, para permitir uma perfeita execução de todas as etapas, sem que haja prejuízo para o processo de polimerização. Essas variações que por ventura ocorrerem deverão ser anotadas para avaliação de sua influência no processo.

Deverá ainda observar a sequência de acréscimo de cada matéria prima pois deverá ser utilizada a sequência que facilita o melhor molhamento da massa. A Figura 3.8 mostra uma massa produzida com rejeito de marmoraria em ponto de moldagem.



Figura 3. 8 - Massa de rejeito de rochas naturais sendo misturada.

Após a colocação da massa no molde, Figura (3.9), o conjunto é submetido a uma vibração provocada por equipamento de vibrar massa de concreto através de magotes vibratórios, Figura (3.10). Estes foram adaptados ao molde, através de orifício de cerca de 30mm feito em fibra de vidro e fixado na estrutura do molde, dando então condições seguras de garantir uma vibração sempre de mesma intensidade e com uniformidade entre uma moldagem e outra, esta adaptação foi realizada com intuito de substituir o processo de vibração existente no chão de fábrica, através de mesas vibratórias, com o objetivo de facilitar a saída das bolhas, e melhorar o fluxo da massa na superfície do molde, dando a melhor uniformidade possível na superfície aberta do molde, Figura 3.9.



Figura 3. 9 - Massa sendo espalhada no molde.

### 3.1.5 - Desmoldagem e acabamento final dos Corpos de prova (CPs)

Como observado em Rabahi (2010), o tempo de desmoldagem é um fator decisivo na verificação da fragilidade do material, tendo um incremento substancial de fragilidade à medida que se diminui o tempo de desmoldagem. Para garantir a uniformidade desta variável todos os ensaios deverão ser realizados com o tempo de desmoldagem de 24 horas.

Após a desmoldagem, o filete de 1,00m x 40,00mm é cortado em sete partes subdivididas de A a G no mesmo filete; e utilizado de 1 a 5 para diferenciar os cinco filetes que são produzidos a cada moldagem, conforme Figura 3.10 e 3.11.



Figura 3. 10 - Disposição dos CPs no molde.

Essa caracterização permitirá a identificação do CP de acordo com sua posição no molde, sendo então possível a avaliação se este posicionamento poderá interferir nas propriedades mecânicas estudadas.



Figura 3. 11 - CPs antes da desmoldagem e depois de cortados com disco de corte.

Após desmoldagem e corte os CPs passam por processo de acabamento para regularização das bordas e retirada de possíveis rebarbas. Os passos descritos anteriormente e as dimensões dos CPs são baseados em processo produtivo industrial, para que os produtos (CPs) tenham a maior semelhança possível com as peças industrializadas e comercializadas em mármore sintético convencional, produzindo pias, tanques, lavatórios, placas, etc. Essa opção é baseada na busca de solução para emprego dos rejeitos, que necessita ter uma aplicação prática para consolidar a solução de reaproveitamento.

A previsão inicial de confecção 19 grupos de formulações diferentes com 35 CPs cada, pode sofrer variações de formulações e processos, e são descritas nos resultados e análises, uma vez que poderá haver alterações durante a execução dos grupos para adequação da formulação que seja homogênea aos diversos tipos de carga utilizada.

## **3.2 - METODOLOGIA DE ENSAIOS**

### **3.2.1 - Método de Flexão de Três Pontos - ASTM D-790-90**

O método de ensaio escolhido para determinação das propriedades mecânicas foi ensaio de flexão em três pontos, baseado na norma ASTM D-790-90 de flexão de materiais compósitos, ver Figura 3.12. Esse procedimento de ensaio é indicado pela simplicidade da confecção dos corpos de prova (CP), pela maior dificuldade de se executar ensaios de tração em materiais frágeis, devido ao possível deslizamento do CP nas garras da máquina de ensaio, e por melhor representar a condição real de fratura (em campo).

De acordo com a Norma supracitada, o procedimento para ensaio de materiais rígidos e semirrígidos é adotado como “*Procedimento A*”, aplicado em materiais que rompem em deflexões pequenas, regido pela equação 3.1, com valores de deformação máxima abaixo de 5%, a qual coincide com o limite superior de deformação de ruptura das resinas poliéster (Daniel e Ishai, 2006).

$$\varepsilon_f = \frac{6ft}{L^2} \quad (3.1)$$

Onde:

$\varepsilon_f$  é a deformação máxima na superfície oposta ao carregamento (ex. 0,05 mm/mm =5%);

$f$  é o valor da deflexão, no ponto de aplicação da carga;

$t$  é a espessura do CP

$L$  é o comprimento entre os apoios (Vão, Figura (3.12)).

Assim substituindo-se o valor máximo da deformação  $\varepsilon_f$ , para “*Procedimento A*”, que é 5%, e os valores utilizados como padrões dos CPs deste Trabalho, quais sejam:  $b = 40\text{mm}$ ,  $t=7\text{mm}$  e  $L=124\text{mm}$  (suporte articulado) e  $L=119,3$  (suporte fixo) obtém-se como valor máximo da deflexão  $f$ , para validação do ensaio como material frágil ou semi-frágil, de acordo com equação 3.1. Os valores de deflexão não deverão ultrapassar os  $f_{max}$  indicados para cada suporte.

$$f = \frac{L^2 \cdot \varepsilon_f}{6 \cdot t} \quad (3.2)$$

- $f_{max} = 18,30\text{mm}$  .....para Suporte Fixo
- $f_{max} = 16,85\text{mm}$  .....para Suporte Articulado

Ao se promover uma flexão, aplicando-se uma força  $P$  no centro do CP, conforme ilustrado na Figura (3.12), provoca-se, além da compressão na região superior, uma tensão de tração, que surge a partir da linha neutra para baixo, e tendo maior valor na superfície inferior da amostra, onde provavelmente terá início a fratura do CP, figura (3.12).

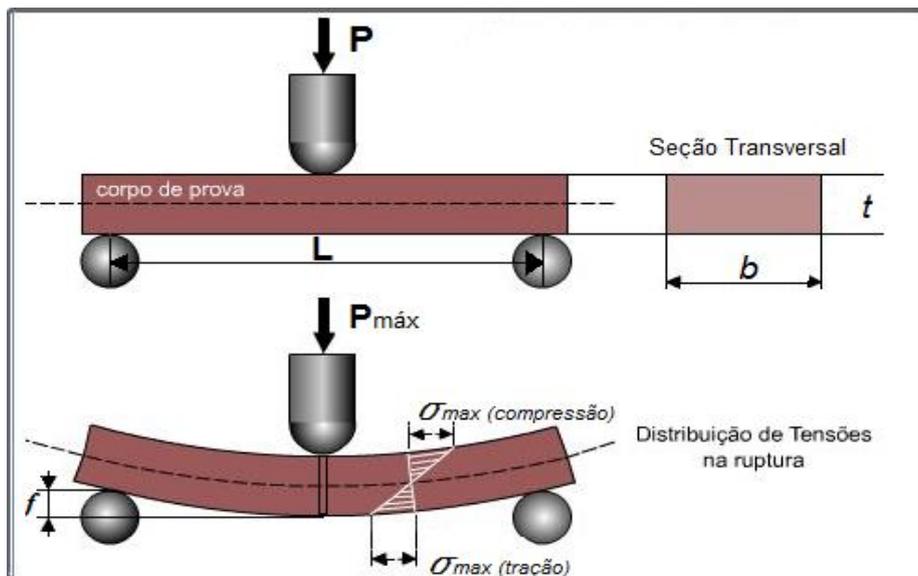


Figura 3. 12 - Ensaio de flexão e distribuição de tensão na seção transversal do CP

Tensão normal máxima devido á flexão (ou módulo de ruptura em flexão),  $\sigma_{max}$ , e o módulo de elasticidade ( $E$ ), podem ser obtidos a partir das equações 2.2 e 2.5,

respectivamente, Nash, (1992) e Askeland et al, (2011), que são válidos para corpos prismáticos regulares conforme ASTM 790-D.

Tabela 3. 2 - Fórmulas para obtenção Tensão normal de flexão ( $\sigma$ ) e Módulo de elasticidade ( $E$ )

Tensão normal máxima á flexão ( $\sigma_{max}$ )	$\sigma = \frac{3}{2} \frac{P.L}{b.t^2}$	Equação (2.2)
Módulo de elasticidade ( $E$ )	$E = \frac{P.L^3}{4.f.b.t^3}$	Equação (2.4)

Onde:

- $f$  é o valor da deflexão, no ponto de aplicação da carga;
- $P$  é a carga aplicada;
- $L$  é o comprimento entre os apoios (Vão, Figura (3.16));
- $b$  é a largura da sessão transversal no ponto de aplicação da força  $P$ ;
- $t$  é a espessura da sessão transversal no ponto de aplicação da força  $P$ .

A resistência de flexão (ou módulo de ruptura em flexão), ( $\sigma_{max}$ ), dado pela equação (2.2), (tabela 3.2), descreve a resistência do material, ao se usar como  $P$  o valor da carga anotado no instante que o CP fratura. Os resultados do teste de flexão incluem a força ( $P$ ) e a deflexão ( $f$ ), e não a deformação (a deflexão tem unidade de comprimento, já a deformação ( $\epsilon$ ) é adimensional e avaliada em %, ver equação (3.1). Observando que materiais dúcteis sofrem um dobramento e materiais frágeis analisados neste trabalho, cujas deformações de ruptura são inferiores a 5%, fraturam, mesmo com pequenas curvaturas.

Segundo a norma ASTM 790, em todos os ensaios destrutivos realizados, a velocidade da deflexão foi controlada e mantida no valor de 1 mm/min. A MTS-809 possui um sistema de aquisição de dados que registrou a força aplicada ( $P$ ), a deflexão ( $f$ ) e o tempo ( $t$ ), conforme tabela (b.2) em anexo (B) e gráfico apresentado na figura (3.13), como exemplo retirado do grupo 22, com carga composta de 70% carga reciclada e 30% de calcário.



Figura 3. 13 - Gráfico obtido através do ensaio de flexão de três pontos

### 3.2.2 - Método de Flexão de Três Pontos com Suporte Articulado

Devido ao objetivo de obter a semelhança dos CPs com a peças de mármore sintético produzidas em escala industrial, optou-se por não proceder a retificação da parte inferior dos CPs, reproduzindo assim com integridade as características dimensionais, inclusive suas imperfeições geométricas.



Figura 3. 14 - Moldagem dos CPs

Como o processo de moldagem é executado manualmente, com auxílio de uma espátula de aço forjado, como mostra a Figura (3.14), os CPs produzidos podem ter diferenças de espessura ao longo de sua superfície, criando assim um plano superficial sem paralelismo com a superfície de superior do CP. Como pode-se observar nas Figuras (3.15 e 3.16). Essa diferença, no caso mais extremo, foi de cerca de 1 mm ou aproximadamente 12%.

Essas irregularidades devem ser compensadas nos suportes (apoios), para manter a superfície superior dos CPs no plano horizontal e garantir apoio total nas superfícies de apoio inferior e superior do suporte de ensaio (aplicador da carga), evitando assim a ocorrência de esforço concentrado ou torção do CPs, durante os ensaios de flexão, o que desconfiguraria o modelo empregado como solução de análise



Figura 3. 16 - CP com grande irregularidade apoiado em suporte fixo



Figura 3. 15 - CP com pequena irregularidade apoiado em suporte fixo



Figura 3. 17 - Correção com lamina de papel

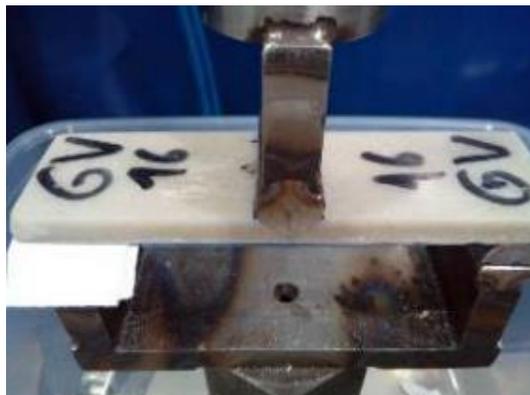


Figura 3. 18 - Correção com lamina de papel

Esse problema já foi enfrentado em trabalhos anteriores, Rabahi (2010), quando foi sanado utilizando laminas de papel para regular a possível distorção dimensional, conforme mostrado nas Figuras (3.17 e 3.18).

Essa correção torna o ensaio demorado e impreciso, uma vez que, mesmo se tratando de lamina de folha de papel com espessura de 0,08mm a correção não ocorria de forma 100% exata. E ainda que, o coeficiente de elasticidade do papel e da pedra sintética são diferentes, e quando essa compensação for próxima de 1mm, os resultados não serão somente devido às características do mármore sintético, mas também devido a compressão das laminas de papel usadas como apoio, podendo assim interferir no

resultado, quanto maior for as irregularidades. Como pode-se observar na figura (3.19), utilizando-se apoios fixos nas extremidades, mesmo que haja contato pleno no atuador central superior, ocorre falta de apoio nas extremidades da peça, ao continuar sem a devida correção neste apoio provoca-se então além da tensão de flexão, uma torção no eixo longitudinal do CP, o que é indesejável para este estudo.



Figura 3. 19 - Defeito acentuado na base inferior antes da carga

O suporte desenvolvido inicialmente segue os parâmetros da norma ASTM D790 - 90, para flexão em três pontos de vigas compostas laminada (Levy Neto e Pardini, 2006), e possui as seguintes dimensões, conforme mostrado na Figura (3.20 (a)) com dimensão  $L=119,3\text{mm}$  (vão) e (b) com dimensão  $L=124,0\text{mm}$  (vão)

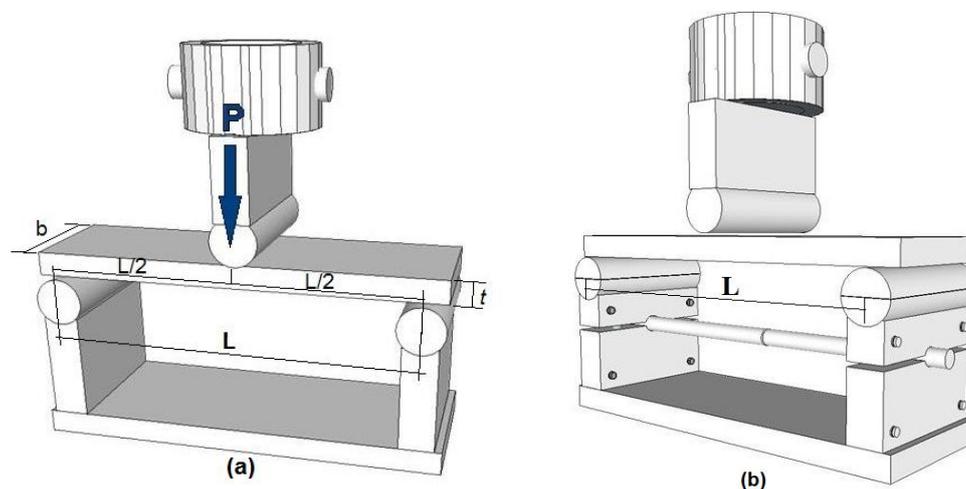


Figura 3. 20 - Ensaio de Flexão em três pontos: (a) Suporte com apoios fixos, (b) suporte com apoios articulados

A partir da necessidade de se desenvolver ensaios com CPs irregulares, propõe-se então a elaboração de suporte que possa compensar essas irregularidades, mantendo sempre

apoio pleno no atuador central do suporte (parte superior), corrigindo então as diferenças de espessuras através do suporte inferior articulado conforme mostra a Figura (3.20 (b)).

Já a Figura (3. 21 (a)) mostra o suporte articulado sendo elaborado como solução para essas correções de forma mais eficiente e prática. Vale lembrar que o atuador central se manteve o mesmo, isso garante uma aplicação da força  $P$  (N), exatamente na perpendicular à superfície superior da peça, paralela ao eixo longitudinal da mesma.



Figura 3. 21 (a) - Elaboração do Suporte Articulado, (b) - Suporte Articulado ameniza a necessidade de correção manuais.

O comprimento do vão  $L$  entre os apoios inferiores, que no suporte fixo era 119,30 mm no articulado essa distância passou a 124,00mm. Essa diferença é admitida pela norma de ensaio adotada (ASTM D790).

No suporte articulado (Figura 3. 20 (b)) a peça se acomoda conforme as imperfeições de fabricação, facilitando a aplicação de Flexão Pura (sem torções devido às irregularidades), no CP, Frischholz, (2004), sem a necessidade de intervenções, garantindo também uma acomodação com maior precisão.

A ação do Suporte Articulado (SA) mostrado na aplicação da força, que gradualmente corrige a superfície de apoio do suporte inferior permitindo apoio pleno em todos os três cilindros de contato do dispositivo SA, Figuras (3.22 (a), (b), (c) e (d)).

Para evitar distorções no início da aplicação de carga no ensaio de flexão é necessário a aplicação de uma pré-carga entre 10N a 30N para acomodação dos suportes inferiores no contato com o CP, gerando um deslocamento que não representa uma deformação da peça.

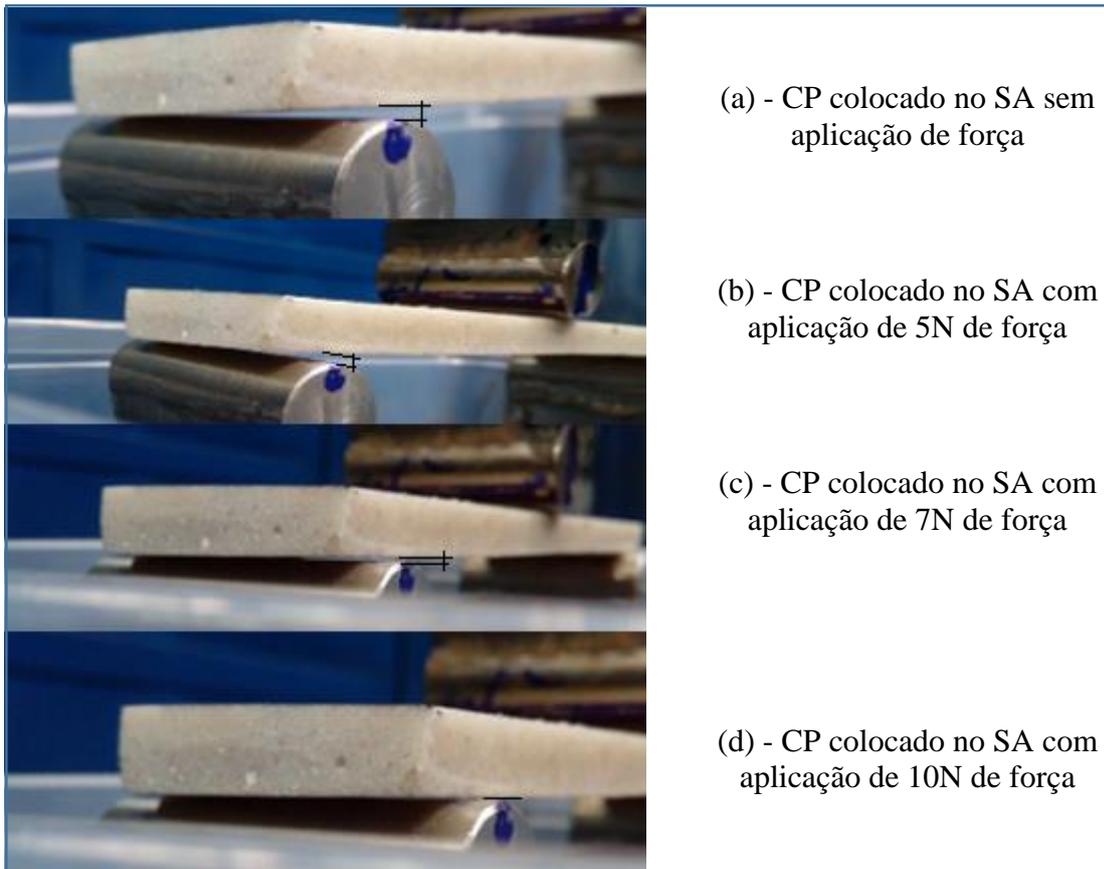


Figura 3. 22 - Acomodação do CP com a Aplicação da Pré carga

Em relação aos processos já citados, como forma de sintetizar um fluxograma das etapas principais envolvidos nesta metodologia de elaboração de CPs, incluindo a execução dos ensaios, são apresentados na Figura (3.23), de forma cronológica.

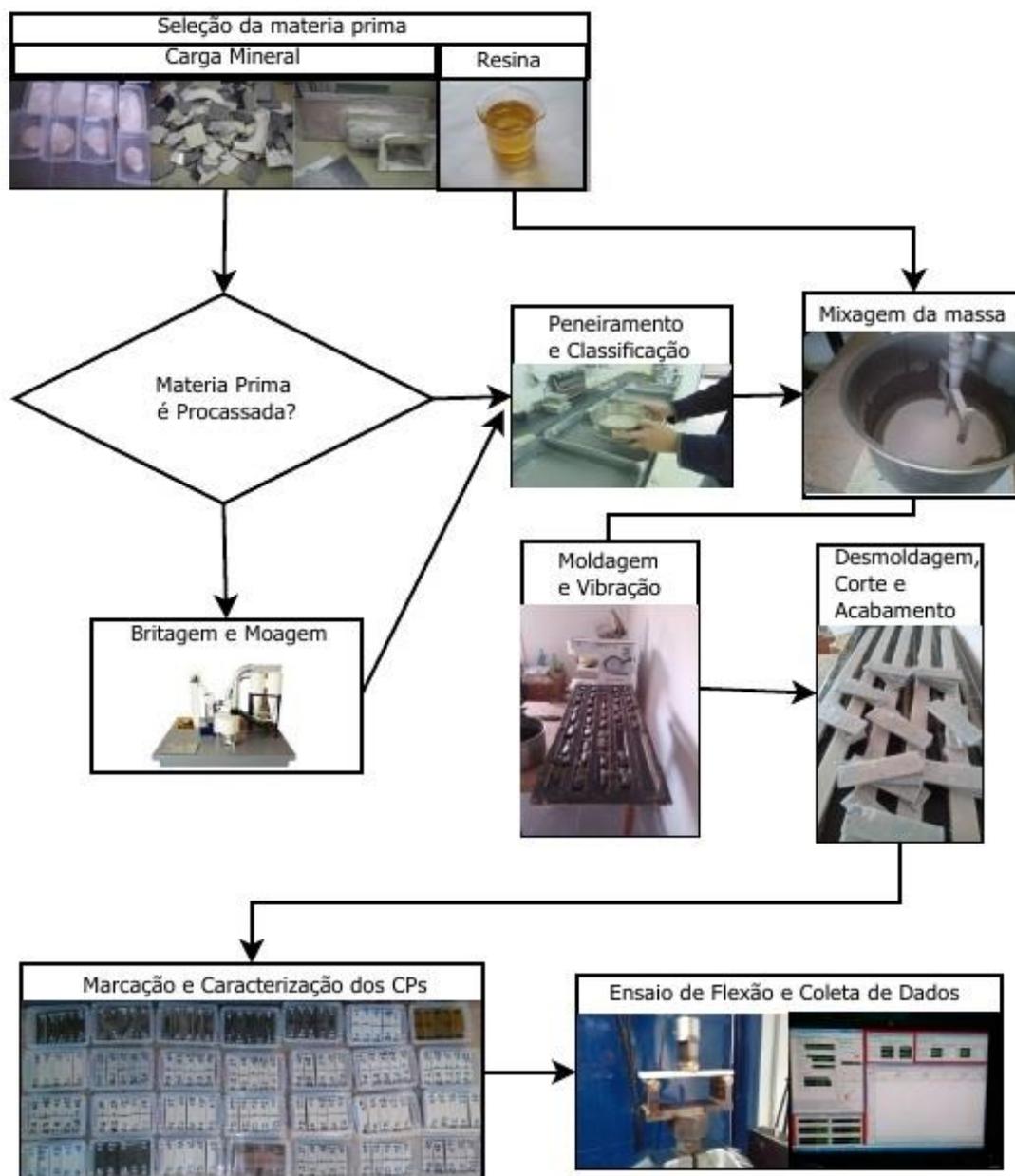


Figura 3. 23 - Diagrama do Processo de confecção ao processo de ensaio dos CPs.

### 3.3 - MODELAGEM MATEMÁTICA

#### 3.3.1 - Considerações Gerais

Ao admitir imperfeições entre as superfícies dos CPs que deveriam ser planos mutuamente paralelos, dando origem a vigas com seção retangular prismáticas, é necessário a reavaliação dos métodos de cálculo da tensão de ruptura ( $\sigma_r$ ), bem como do módulo de elasticidade ( $E$ ), propostos anteriormente e baseados em vigas de seção retangular constante. As seções na prática são próximas de trapézios (combinação de um

retângulo com um triângulo, conforme detalhado na seção 3.3.2 a seguir), e variam ao longo do comprimento e da direção transversal das vigas.

### 3.3.2 - Momento de Inércia para Seções Irregulares.

As irregularidades são observadas ao longo de todo *CP*, mas, para efeito de cálculo da tensão de ruptura a seção de maior solicitação ocorre no ponto médio entre os apoios ( $L/2$ ), conforme diagrama de distribuição de forças da figura (3.24).

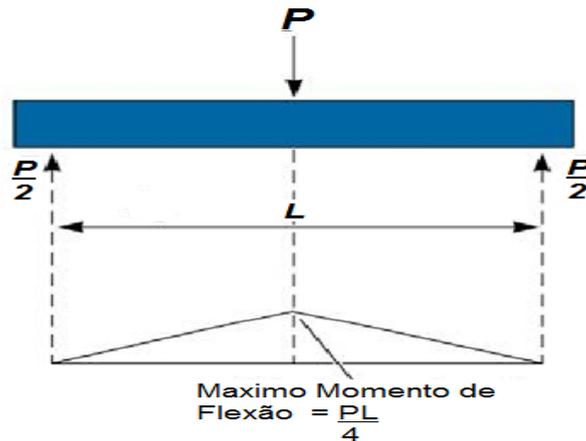


Figura 3. 24 - Diagrama de esforços e momentos fletores em ensaio de flexão de três pontos (adaptado de Askeland et al, (2008)).

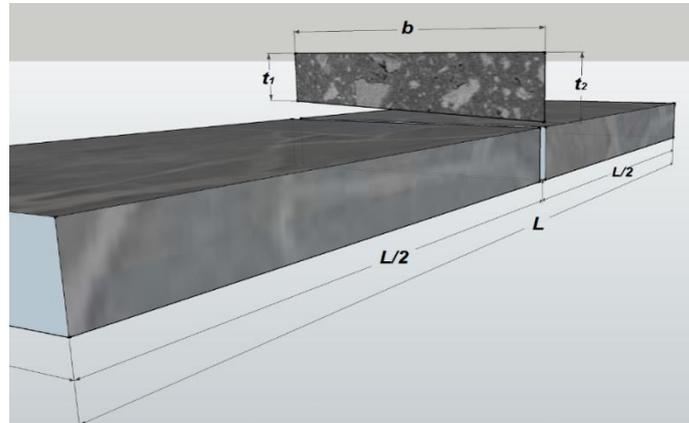


Figura 3. 25 - Seção irregular na região de maior solicitação.

Para análise específica da seção transversal que é submetida ao esforço máximo no ensaio de flexão de três pontos, no ponto médio entre os apoios. A irregularidade da seção transversal é mostrada nas Figuras (2.25 e 3.26).

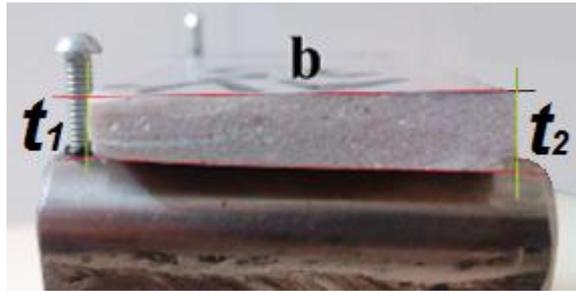


Figura 3. 26 - Variação de espessura do CP A5- Grupo 15, na seção transversal.

As irregularidades da seção transversal podem ser trabalhadas como sendo uma variação de espessura criando a Figura de um trapézio. Assim, considere a seção transversal de uma viga trapezoidal dada pela Figura (3.27).

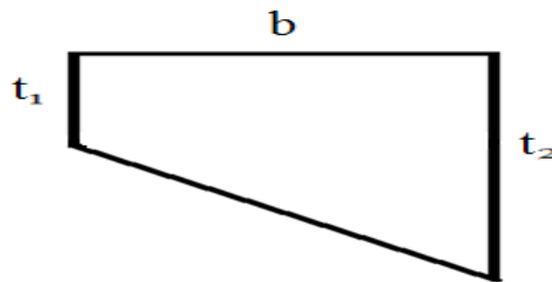


Figura 3. 27 - Seção transversal de uma viga trapezoidal

O momento de inércia dessa viga pode ser calculado utilizando o teorema dos eixos paralelos. Para isso, considera-se a seção transversal da Figura (3.27) como sendo a composição de um retângulo e um triângulo retângulo, como mostrado na Figura (3.28).

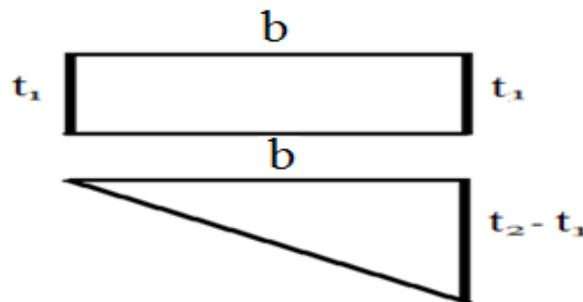


Figura 3. 28 - Composição da seção apresentada na Figura (3.27)

A componente  $y$  do centro de gravidade da seção trapezoidal, apresentada na Figura (3.25) é dada por:

$$y_{cg} = \frac{t_1^2 + t_1 t_2 + t_2^2}{3(t_1 + t_2)} \quad (3.5)$$

O momento de inércia do retângulo apresentada na Figura 3.28 é dado por:

$$I_{ret,cg} = I_{ret} + A_{ret}d_{ret}^2 \quad (3.6)$$

Onde:

- $I_{ret}$  é o momento de inércia do retângulo;
- $A$  é área do retângulo;
- $d$  é a distância do centroide da geometria em relação ao centroide da seção transversal;

O momento de inércia do retângulo é dado por:

$$I_{ret} = \frac{bt_1^3}{12} \quad (3.7)$$

A área do retângulo é dada por:

$$A = t_1 b \quad (3.8)$$

O valor de  $d_{ret}^2$  pode ser calculado como:

$$d^2 = \left( y_{cg} - \frac{t_1}{2} \right)^2 = \frac{(t_1 - t_2)^2 (t_1 + 2t_2)^2}{36(t_1 + t_2)^2} \quad (3.9)$$

Por fim,  $I_{ret,cg}$  é dado por:

$$I_{ret,cg} = \frac{t_1(t_1^4 + 2t_2t_1^3 - t_2^3t_1 + t_2^4)b}{9(t_1 + t_2)^2} \quad (3.10)$$

O momento de inércia do triângulo é dado por:

$$I_{tri,cg} = I_{tri} + A_{tri}d_{tri}^2 \quad (3.11)$$

$I_{tri}$  é dado por:

$$I_{tri} = \frac{b(t_2 - t_1)^3}{36} \quad (3.12)$$

$A_{tri}$  é dada por:

$$A_{tri} = \frac{b(t_2 - t_1)}{2} \quad (3.13)$$

$d_{tri}^2$  é dado por:

$$d_{tri}^2 = \left( t_1 + \left( \frac{t_2 - t_1}{3} \right) \right) - y_{cg} = \frac{t_1^2(t_1 + 2t_2)^2}{9(t_1 + t_2)^2} \quad (3.14)$$

Finalmente,  $I_{tri,cg}$  é dado por:

$$I_{tri,cg} = \frac{(t_2 - t_1)}{36} \left( (t_1 - t_2)^2 + \left( \frac{2t_1^2(t_1 + 2t_2)^2}{(t_1 + t_2)^2} \right) \right) b \quad (3.15)$$

Assim, o momento de inércia na Figura (1) é dado por:

$$I_{trap,cg} = I_{ret,cg} + I_{tri,cg} = \frac{(t_1^4 + 2t_2t_1^3 + 2t_2^3t_1 + t_2^4)b}{36(t_1 + t_2)} \quad (3.16)$$

Se considerarmos o trapézio como um retângulo médio, obtido a partir da média das espessuras, o momento de inércia seria dado por:

$$I_{ret,med,cg} = \frac{b \left( \frac{t_2 + t_1}{2} \right)^3}{12} \quad (3.17)$$

Para avaliar-se o impacto que a diferença de espessura na seção de ruptura pode provocar nas duas formas de cálculo, é possível então verificar a diferença percentual entre  $I_{ret,med,cg}$  e  $I_{trap,cg}$  que é dada por:

$$\frac{I_{ret,med,cg} - I_{trap,cg}}{I_{trap,cg}} 100 = \frac{36(t_1 + t_2) \left( \frac{(t_1 + t_2)^3}{96} b - \frac{(t_1^4 + 2t_2t_1^3 + 2t_2^3t_1 + t_2^4)b}{36(t_1 + t_2)} \right)}{(t_1^4 + 2t_2t_1^3 + 2t_2^3t_1 + t_2^4)b} 100 \quad (3.18)$$

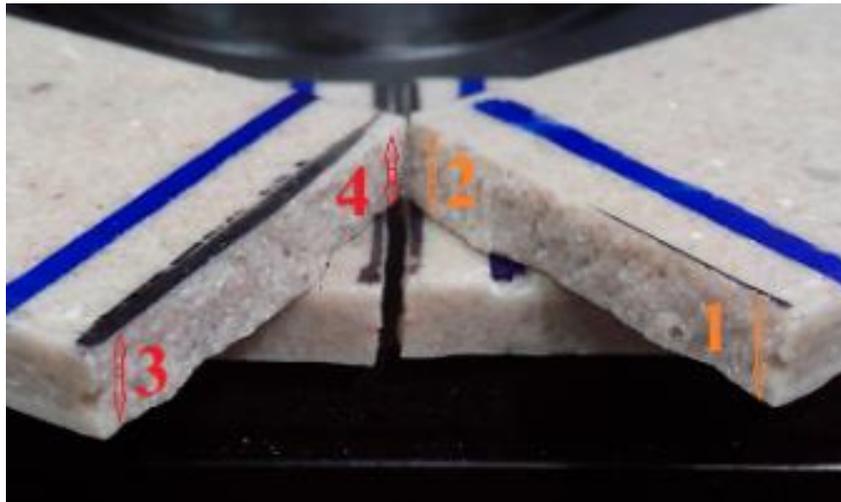


Figura 3. 29 - Pontos de medição pós ruptura

Como forma de minimizar variações nas medições obtidas, em função das irregularidades do CP, o ponto de medida  $t_1$ , será a média entre os pontos 1 e 3, e a medida  $t_2$ , a média entre os pontos 2 e 4, Figura (3.29).

### 3.3.3 - Momento de Inércia ao longo do CP.

O momento de inércia da seção transversal, influi nos cálculos da tensão de ruptura a flexão ( $\sigma_r$ ) e do módulo de elasticidade ( $E$ ): Como os cálculos, apresentados anteriormente se basearam em vigas de seção retangular constante, e as equações (3.5) a (3.18) evidenciam que os cálculos de momentos de inércia de seções transversais são muito trabalhosos. E, considerando-se que estas seções variam continuamente, nas direções longitudinal e transversal das vigas (ver Figura 3.31(a)), decidiu-se fazer simulações numéricas para analisar as tensões e deformações dos CPs.

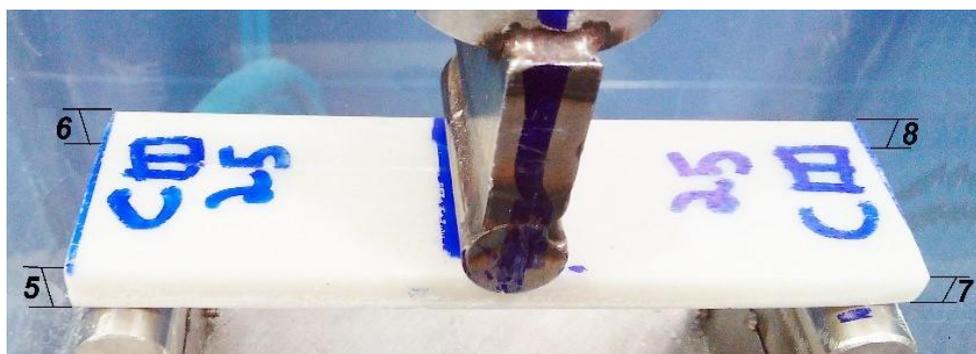


Figura 3. 30 - Posição das medidas 5, 6, 7 e 8 no CP padrão e exemplo de medidas irregulares no CP C3 grupo 25

A proposta deste trabalho, no que concerne à análise numérica de tensões e deformações de CPs com superfícies não paralelas entre si, formando seções transversais trapezoidais variáveis, é adotar o programa ANSYS como ferramenta de tratamento de dados em elementos finitos.

Considerando o seccionamento do CP em seções transversais e analisando o comportamento de cada seção, através de modelagem por elementos finitos, pode-se discretizar o domínio em elementos, com estruturas prismáticas regulares que se comportam como previsto pelas equações matemáticas já apresentadas (Equações 2.2 e 2.4), conforme ASTM 790-D. (ver Figura 3.31 (a) e (b)).

Considerando que a superfície superior, que ficará em contato com o atuador central (ver Figura 3.30), é perfeitamente plana, e a superfície inferior, em contato com os apoios

inferiores do suporte, com variações na espessura, como mostra a figura (3.26), Inicia-se o estudo através do ANSYS, aplicando-se variações de espessuras aleatórias, para simular numericamente um modelo que seja compatível com as variações apresentadas nos corpos de prova, para comparar com os resultados obtidos. Esta análise é essencial para a complementação deste estudo, e consolidação da análise de propriedades mecânicas com o suporte articulado, concebido como solução de ensaio de CPs irregulares.

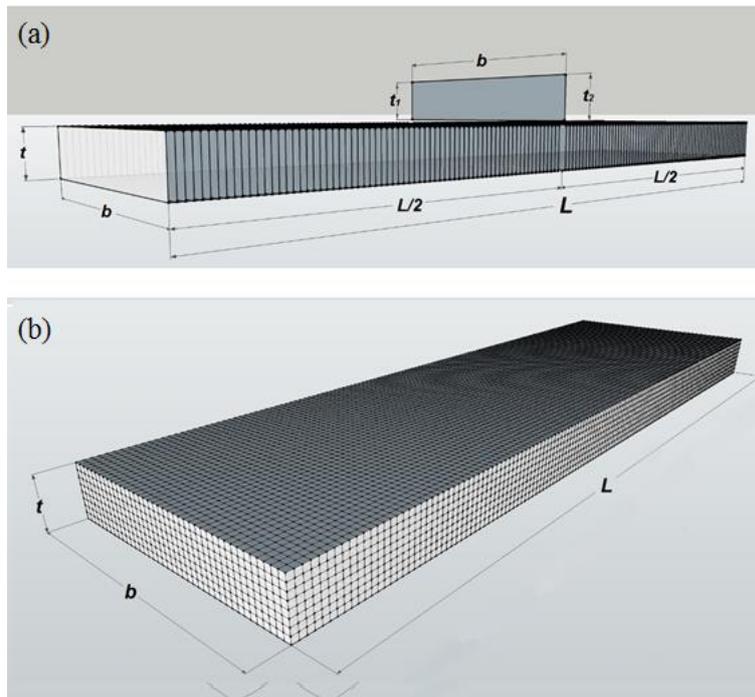


Figura 3. 31 (a) - Fracionamento das seções do CP, (b) - Discretização do CP em Elementos prismáticos

Para simulações de cálculo com a finalidade de encontrar o Modulo de Elasticidade ( $E$ ) que mais represente o CP, foi desenvolvido, no programa Ansys, uma rotina de cálculo para a convergência do Modulo de Elasticidade que melhor se adapta à flecha de deslocamento obtida pelos ensaios experimentais. Esse programa consiste no fornecimento, das medidas dimensionais de espessura ao longo de todo CP ( $t$ ), a força experimental ( $P$ ), que corresponde à *flecha experimental* ( $f$ ), (extraídas do ensaio de Flexão), o Módulo de Elasticidade ( $E$ ) obtido através da fórmula padrão, equação (2.5), largura do CP ( $b$ ) e vão do ensaio ( $L$ ). Essas informações são inseridas em um arquivo de dados de entrada, o Ansys armazena as informações e entra em um laço de repetição que vai de 1 até o número de dados dispostos no arquivo de entrada. Cada CP é simulado e o

valor da flecha máxima numérica é obtido. Logo em seguida, é calculada a variável *erro* pela equação (3.19):

$$erro = \frac{f_{num} - f_{exp}}{f_{exp}} \quad (3.19)$$

Onde  $f_{num}$  é a *Flecha numérica* e  $f_{exp}$  a *Flecha experimental*. Caso o valor absoluto da variável *erro* seja menor que 0,5 % (0,005), o valor do módulo de elasticidade encontrado pela equação (2.5) está correto e o próximo CP é avaliado. Caso contrário, o módulo de elasticidade obtido pela fórmula é corrigido pelo seguinte fator, equação (3.20):

$$fator = \frac{f_{exp}}{f_{num}} \quad (3.20)$$

*fator* é o fator de correção para recálculo do Módulo de Elasticidade,  $E_{corrigido} = E \cdot fator$ . Roda-se a simulação novamente com o Módulo de Elasticidade corrigido e, ao final, calcula-se o *erro* novamente. Caso o valor absoluto do *erro* da simulação com o módulo de elasticidade corrigido seja menor que 0,5 %, o Módulo de Elasticidade corrigido é o Módulo de Elasticidade do material. Caso contrário, o Módulo de Elasticidade deve ser novamente corrigido. Assim espera-se obter um resultado do Módulo de Elasticidade de cada CP, que melhor represente a flecha obtida experimentalmente. A discretização da malha dos CPs é representada pelas Figuras 3.31(a e b).

Método de Cálculo		Tipo de Suporte no Ensaio	
XXX,XX	Simulação Numérica		Suporte Articulado
XXX,XX	Método Analítico		Suporte Fixo
Acabamento Superficial inf.		Grupo total	
	Sem Desbaste		
	Com Desbaste		

Figura 3. 32 - Legenda utilizada nas tabelas para identificação de dados quanto ao tipo de suporte e o método de cálculo utilizados, e acabamento superficial do CP.

A legenda da Figura (3.32) identifica as informações nas Tabelas (3.3 e 3.4) e em todas as tabelas deste trabalho que identificam dados dos ensaios e dos CPs, com diferentes tipos de suportes, acabamento do CP e método de cálculo.

Tabela 3. 3 - Tabela de dados para aquisição de dados do programa de simulação

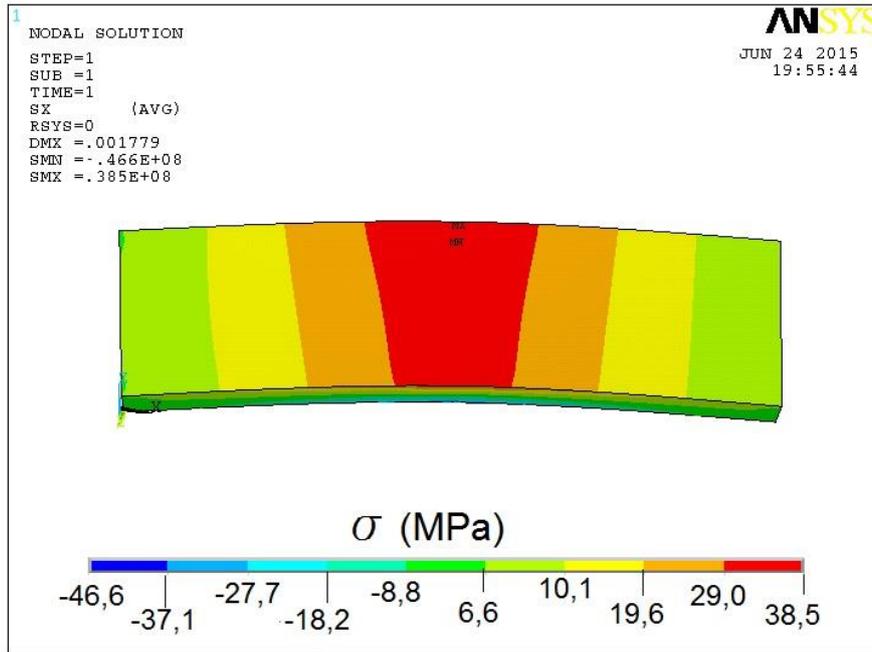
Grupo 22	espessura t (mm)				Força Ruptura (N)	Flecha (mm)	E (Gpa)	espessura t (mm)				ℓ (mm)	w (mm)	Vão de ensaio (mm)
	1	2	3	4				5	6	7	8			
A1	6,72	7,34	6,71	7,33	330,72	1,23	8,25	6,88	7,36	8,36	8,38	143,20	39,48	124,00
B1	6,87	7,22	6,87	7,22	326,50	1,18	8,55	7,02	7,16	6,92	7,12	141,50	39,26	119,30
C1	7,32	7,28	7,32	7,28	345,80	1,23	8,87	7,38	7,28	7,18	7,16	143,60	39,06	124,00
D1	7,64	7,59	7,64	7,61	389,60	1,08	9,02	7,36	7,88	7,66	7,22	143,00	39,42	119,30
E1	7,69	8,38	7,71	8,38	407,60	1,10	8,68	8,00	8,66	7,78	7,66	142,30	39,24	124,00
F1	7,63	8,53	7,62	8,51	430,20	1,06	9,27	7,90	8,28	8,00	8,58	142,90	39,18	124,00
G1	7,57	7,99	7,58	7,97	416,10	1,11	8,13	8,14	8,14	7,78	8,10	139,40	39,18	119,30
A2	7,52	7,19	7,51	7,21	369,40	1,13	7,69	7,46	7,10	9,00	8,54	139,70	40,08	119,30
B2	6,89	6,81	6,88	6,81	308,30	1,25	7,79	6,98	6,76	7,26	7,22	142,80	39,98	119,30
C2	7,16	6,39	7,17	6,41	328,15	1,41	8,75	6,94	6,36	7,20	6,78	142,70	40,04	124,00
D2	6,76	5,99	6,77	6,01	267,70	1,42	7,77	7,00	6,64	6,88	6,38	140,30	40,14	124,00
E2	7,46	7,06	7,46	7,06	355,00	1,18	8,44	7,36	7,38	7,06	6,74	143,90	40,28	119,30
F2	7,26	6,71	7,25	6,72	351,00	1,32	8,35	6,62	6,80	7,36	7,42	140,60	39,88	119,30
G2	7,97	7,89	7,98	7,91	428,10	1,21	6,96	9,40	9,30	6,82	6,58	142,60	40,04	119,30
A3	7,32	6,52	7,33	6,51	302,47	1,26	8,29	6,38	6,10	8,74	8,18	139,70	39,38	124,00
B3	6,89	5,83	6,89	5,83	278,48	1,55	7,60	7,36	6,68	6,62	5,96	142,50	39,18	124,00
C3	7,94	7,21	7,94	7,22	375,20	1,17	8,03	8,04	7,46	7,42	6,78	143,20	39,22	119,30
D3	7,81	7,16	7,81	7,18	385,78	1,25	8,61	7,66	7,22	8,06	7,38	142,20	39,72	124,00
E3	7,71	7,46	7,72	7,46	385,70	1,15	8,53	7,58	7,18	7,72	7,26	144,80	39,28	119,30
F3	6,94	6,19	6,91	6,21	290,33	1,39	8,85	6,34	5,80	7,56	7,10	146,10	39,28	124,00
G3	6,65	6,25	6,65	6,25	269,54	1,34	7,47	8,14	7,90	6,34	5,70	138,90	39,24	124,00
A4	7,99	8,33	8,00	8,34	477,30	1,20	7,34	7,54	8,84	9,00	9,22	138,60	40,08	119,30
B4	7,55	7,78	7,56	7,79	393,40	1,20	8,94	7,52	7,10	7,62	7,86	141,60	39,98	124,00
C4	6,99	7,33	6,98	7,33	354,00	1,11	8,76	7,68	7,90	6,92	6,88	140,00	39,76	119,30
D4	6,99	7,28	6,98	7,29	350,80	1,19	7,91	7,24	7,54	7,66	7,86	143,10	39,98	119,30
E4	6,56	6,99	6,56	6,98	294,27	1,30	8,87	6,28	6,90	7,00	7,26	143,60	39,42	124,00
F4	6,89	7,35	6,88	7,34	357,80	1,30	7,83	7,82	8,18	6,22	6,48	143,90	39,62	119,30
G4	7,83	8,14	7,84	8,12	434,00	1,03	8,12	8,44	8,88	7,90	8,18	142,60	40,00	119,30
A5	7,51	7,08	7,52	7,09	371,20	1,12	8,31	7,64	7,18	8,08	7,86	142,70	39,94	119,30
B5	8,29	7,55	8,30	7,56	418,09	1,17	8,74	8,34	7,68	7,66	7,04	140,90	40,18	124,00
C5	7,81	7,39	7,81	7,39	364,13	1,14	8,93	7,18	7,00	8,10	7,82	141,80	40,08	124,00
D5	6,82	6,61	6,81	6,62	317,77	1,40	8,57	6,96	5,84	7,12	7,04	141,50	41,00	124,00
E5	6,01	6,24	6,00	6,23	290,00	1,34	8,22	7,48	7,44	6,00	5,90	143,20	40,14	119,30
F5	7,58	7,27	7,58	7,27	384,50	1,14	8,44	7,76	7,46	7,54	7,32	144,60	40,12	119,30
G5	7,27	6,86	7,28	6,87	335,20	1,10	7,82	7,86	7,76	7,60	7,36	143,20	40,62	119,30

Após obtido o arquivo com as informações de Módulo de Elasticidade ( $E$  ansys), Tensão de Ruptura ( $\sigma_r$  Ansys) e Flecha ( $f$  Ansys), estes foram tratados e dispostos em tabela comparativas com os resultados obtidos pelo Método analítico, que calcula através das fórmulas (2.2 e 2.4), como mostrado na Tabela (3.4) que se refere ao Grupo 22

As Figura (3.33 e 3.34), mostram o comportamento da Tensão  $\sigma$  ao longo do CP com irregularidade máxima simulada em 2mm em diagonal, (provocando torsão no CP) de diferença ao longo do CP, a cor Vermelha indica tração e a Azul indica compressão, na a tensão igual a zero está na região verde. Na vista lateral é possível observar a linha neutra na cor verde.

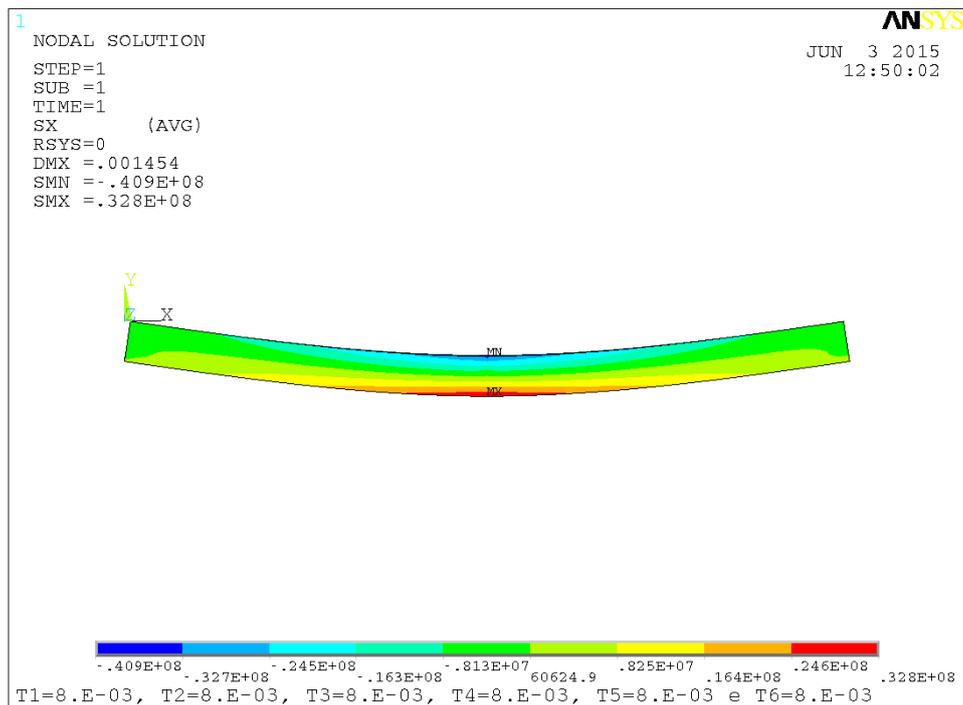
Tabela 3. 4 - Formato de dados obtidos pela simulação numérica e pelo método analítico do Grupo 22

Grupo 22	Simulação Numérica			Método Analítico		
	E Ansys (GPa)	Flecha Ansys (mm)	Tensão Ansys (MPa)	E (Gpa)	Flecha Exp. (mm)	Tensão Ruptura (Mpa)
A1	9,07	1,23	32,65	8,25	1,23	31,57
B1	8,87	1,18	30,09	8,55	1,18	29,98
C1	9,20	1,23	32,53	8,87	1,23	30,90
D1	9,18	1,08	33,57	9,02	1,08	30,42
E1	9,06	1,10	30,03	8,68	1,10	29,85
F1	9,72	1,06	31,66	9,27	1,06	31,36
G1	8,78	1,11	31,76	8,13	1,11	31,44
A2	8,52	1,13	31,77	7,69	1,13	30,45
B2	8,25	1,25	37,49	7,79	1,25	29,45
C2	9,21	1,41	33,66	8,75	1,41	33,11
D2	8,60	1,42	31,23	7,77	1,42	30,43
E2	8,74	1,18	30,00	8,44	1,18	29,92
F2	8,59	1,32	32,74	8,35	1,32	32,28
G2	7,88	1,21	37,64	6,96	1,21	30,35
A3	8,85	1,26	30,58	8,29	1,26	29,83
B3	8,57	1,55	33,68	7,60	1,55	32,68
C3	8,49	1,17	30,21	8,03	1,17	29,80
D3	9,11	1,25	32,76	8,61	1,25	32,16
E3	8,77	1,15	30,71	8,53	1,15	30,54
F3	9,23	1,39	32,57	8,85	1,39	31,95
G3	8,96	1,34	31,88	7,47	1,34	30,71
A4	7,77	1,20	33,44	7,34	1,20	31,97
B4	9,11	1,20	31,06	8,94	1,20	29,93
C4	9,48	1,11	31,36	8,76	1,11	31,08
D4	8,56	1,19	31,64	7,91	1,19	30,84
E4	9,05	1,30	30,82	8,87	1,30	30,29
F4	8,54	1,30	32,21	7,83	1,30	31,92
G4	8,88	1,03	31,23	8,12	1,03	30,49
A5	9,08	1,12	32,01	8,31	1,12	31,21
B5	9,13	1,17	31,23	8,74	1,17	30,82
C5	9,08	1,14	29,38	8,93	1,14	29,26
D5	9,02	1,40	32,76	8,57	1,40	31,97
E5	9,70	1,34	35,60	8,22	1,34	34,52
F5	8,99	1,14	31,40	8,44	1,14	31,11
G5	8,84	1,10	30,35	7,82	1,10	29,54
<b>Media Total</b>	<b>8,96</b>	<b>1,20</b>	<b>31,76</b>	<b>8,35</b>	<b>1,20</b>	<b>30,82</b>
Desvio Padrão	0,41	0,12	1,86	0,53	0,12	1,13
<b>CV</b>	<b>4,6%</b>	<b>9,8%</b>	<b>5,8%</b>	<b>6,4%</b>	<b>9,8%</b>	<b>3,7%</b>
<b>Suporte Fixo</b>	<b>8,78</b>	<b>1,18</b>	<b>31,70</b>	<b>8,17</b>	<b>1,18</b>	<b>30,52</b>
Desvio Padrão	0,46	0,08	2,19	0,50	0,08	1,15
<b>CV</b>	<b>5,2%</b>	<b>6,7%</b>	<b>6,9%</b>	<b>6,1%</b>	<b>6,7%</b>	<b>3,8%</b>
<b>Suporte Articulado</b>	<b>9,07</b>	<b>1,26</b>	<b>31,88</b>	<b>8,68</b>	<b>1,26</b>	<b>30,90</b>
Desvio Padrão	0,26	0,13	1,23	0,51	0,13	1,08
<b>CV</b>	<b>2,9%</b>	<b>10,4%</b>	<b>3,9%</b>	<b>5,9%</b>	<b>10,4%</b>	<b>3,5%</b>



**COMPRESSÃO MÁXIMA**    **ZERO**    **TRAÇÃO MÁXIMA**

Figura 3. 33 - Simulação numérica (ANSYS) da distribuição de tensão ao longo do CP



**COMPRESSÃO MÁXIMA**    **ZERO**    **TRAÇÃO MÁXIMA**

Figura 3. 34 - Simulação numérica (ANSYS) da distribuição de tensão ao longo do CP

A torção nos CPs, indesejada para esse estudo, poderá ser objeto de análise em estudos futuros, sobre sua influência na falha da peça, podendo se criar ensaios com torsões pré-estabelecidas, utilizando-se o suporte articulado, travado em posição de desalinhamento, conforme a Figura (3.35).

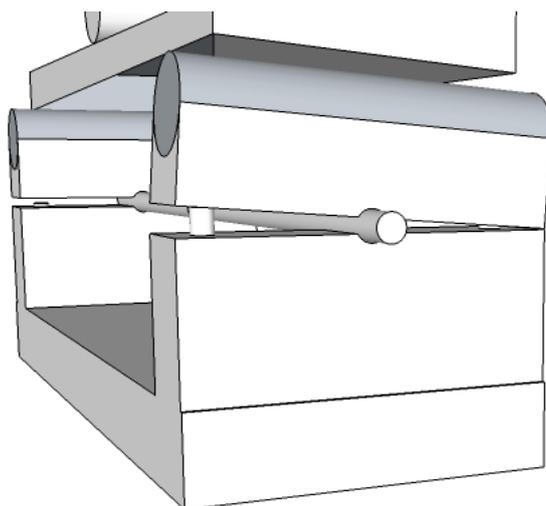


Figura 3. 35 - Simulação de torsão provocada por desalinhamento no suporte.

### **3.4 - METODOLOGIA ESTATÍSTICA DE WEIBULL**

Em função da grande variação dos resultados (fraturas frágeis), tornou-se imprescindível que os dados fornecidos pelo ensaio de flexão em três pontos tivessem um tratamento estatístico adequado. A análise proposta foi a de Weibull, pois ela descreve a fração das amostras que fraturam em diferentes tensões aplicadas. À medida que aumenta o teor de falhas e defeitos acumulados nos corpos de prova, diminui-se a tensão de ruptura, ficando caracterizada a analogia de que as correntes nunca são mais resistentes do que seu elo mais fraco, rompendo-se neste ponto. Assim, ao estender este conceito para os materiais frágeis, Weibull representou os elos por pequenos volumes da peça, sendo, o elo mais fraco, equivalente à região que contém a falha crítica. Weibull propôs também uma função empírica de distribuição de probabilidade de falhas e obteve a expressão para a probabilidade de fratura acumulada, conhecida como Distribuição de Weibull, Askeland et al, (2011).

A distribuição de Weibull trabalha com a probabilidade do material, após a aplicação de uma determinada tensão, resistir ou não, mesmo que esta tensão esteja abaixo da média do limite de resistência estática convencional do material. Isto é, o rompimento do material se dará pela ocorrência de falhas em seu processo produtivo e a distribuição de Weibull quantifica esta probabilidade. Pode-se observar na Figura (3.36), a diferença de comportamento de um material dúctil e outro material frágil, na dispersão dos resultados, sendo o material dúctil de resultados menos dispersos, Askeland e Phulé, (2008).

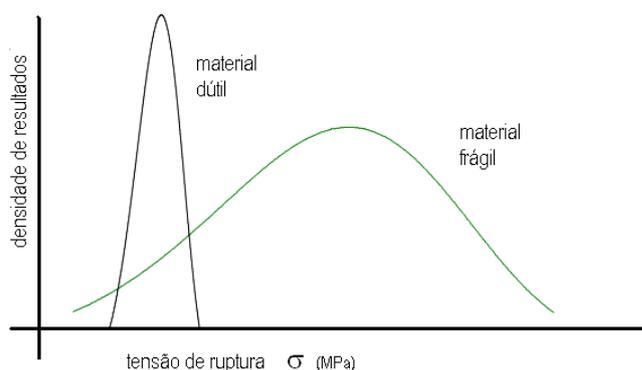


Figura 3. 36 - Distribuição de Weibull de amostras que fraturam sob tensão aplicada - material dúctil e material frágil, Askeland e Phulé, (2008).

O método, da posição relativa, utilizado para determinar as probabilidades de falha, que analisa um corpo de prova de volume  $V$ , poderá apresentar uma variação de falhas e descontinuidades que, estando ele submetido a uma tensão normal  $\sigma$ , pode-se subdividir em  $n$  partes unitárias do sólido de volume  $V_0$ , sendo que cada elemento tem a mesma distribuição de defeitos, ou seja, a probabilidade de sobrevivência é  $P(V_0)$  e vai ser igual à  $1 - F(V_0)$ , onde  $F(V_0)$  é probabilidade de falha, Weibull, (1939). Assim, inicialmente, ordena-se os resultados experimentais das tensões de falha de forma crescente (i.e. dá mais baixa à mais elevada), numerando-as a partir do número um até  $n$  (número total de amostras) Wilks, (1942). Assim, as probabilidades de falha  $F(V)_j$ , em um lote de  $n$  CPs, para cada ensaio  $j$ , com  $1 \leq j \leq n$ , correspondem à classificação numérica (posição na tabela (1, 2,...,  $n$ )), dividido por  $(n+1)$ , ou seja, obtém-se  $F(V)_j$ , equação (3.21), para os valores de  $\sigma_{max}$ , obtidos pela equação (2.2), que por sua vez, são os resultados experimentais dos ensaios e classificando-os então, pelo método da posição relativa, Green, (1998).

$$F(V)_j = \frac{j}{n+1} \quad (3.21)$$

Para analisar um corpo de prova de volume  $V$ , que poderá apresentar uma variação de falhas e descontinuidades, estando ele submetido a uma tensão  $\sigma$ , pode-se subdividir em  $n$  partes de volume  $V_0$  onde cada parte tem a mesma distribuição de defeitos. Assim, segundo Askeland et al, (2011) “pode-se mostrar que a probabilidade de sobrevivência dos corpos de prova  $P(V_0)$ , ou seja, a probabilidade de um material frágil não frature sob a tensão aplicada  $\sigma$  é dada pela equação (3.22).” Seguindo o mesmo raciocínio podemos ainda escrever que a probabilidade de falha  $F(V_0) = 1 - P(V_0)$ , e  $P(V_0)$  é obtido da seguinte equação:

$$P(V_0) = \exp \left[ - \left( \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (3.22)$$

A partir da equação (3.22), onde  $\sigma$  é a tensão aplicada,  $\sigma_0$  a resistência intrínseca que correspondente a probabilidade de sobrevivência de 37% ou ainda  $P(V_0)=0,37$ , e  $\sigma_u$  é a tensão onde a probabilidade de falha é nula, ou ainda, a probabilidade de sobrevivência é 1,0. O módulo de Weibull  $m$  pode variar de 0 a aproximadamente 100 e representa a repetibilidade da resistência mecânica do material, esses valores estão diretamente ligados às características do material analisado como, homogeneidade, quantidade de defeitos como bolhas, impurezas ou descontinuidades, entre outros. O módulo de Weibull  $m$  tem valores próximos a 3 para cerâmicas (materiais frágeis) e próximo a 100 para metais e ligas (dúcteis). Alguns materiais cerâmicos especiais podem alcançar um módulo  $m$  entre 5 e 10 Askeland e Phulé, (2008).

Para materiais frágeis onde existe uma variação considerável nos valores correspondentes às tensões de ruptura, adota-se como valor seguro, quando não haverá falha no material testado, a tensão de ruptura onde a probabilidade de falha é nula,  $\sigma_u$ , igual a 0, assim para esses materiais pode-se através da equação (3.22) encontrar a seguinte equação:

$$F(V_0) = 1 - P(V_0) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (3.23)$$

Portanto, analisando a equação (3.23), pode-se constatar que para uma tensão

aplicada  $\sigma$  nula, a probabilidade de sobrevivência, com certeza, será de 100% e ainda com o acréscimo da tensão aplicada  $\sigma$ , a probabilidade de sobrevivência  $P(V_0)$  diminui, alcançando valores próximos a zero para tensões aplicadas  $\sigma$ , muito maiores que a resistência intrínseca  $\sigma_0$ . Assim, a partir também da equação (3.22) pode-se comprovar que quando  $\sigma = \sigma_0$  a probabilidade de sobrevivência  $P(V_0)$  passa a ser igual a  $1/e \approx 0,37$  ou 37%, ou ainda que a probabilidade de falha  $F(V_0)$  seja aproximadamente igual a 0,63, ou 63%, Askeland et al, (2011).

O expoente  $m$ , chamado de Módulo de Weibull, é adimensional e fornece uma avaliação da homogeneidade do material e, conseqüentemente, da repetibilidade de seus valores de resistência e de sua confiabilidade estrutural. Quanto menor o módulo de Weibull, maior é a dispersão dos resultados, tornando o material susceptível a falhas em uma maior faixa de tensões. Já para valores elevados do parâmetro, a dispersão torna-se menor em um estreito intervalo em torno de  $\sigma_0$ . Assim, quanto maior o  $m$ , maior é a confiabilidade do material, pois a dispersão das tensões de ruptura medidas é menor.

Após desenvolvimento da equação (3.23), o Modulo de Weibull pode ser determinado, para materiais frágeis, pela equação (3.24):

$$m = \frac{\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(V_0)}\right)\right)}{(\ln(\sigma)-\ln(\sigma_0))} \quad (3.24)$$

Existem outras formas de se avaliar a probabilidade, porém segundo Bergman, (1983) o método proposto por Wilks, (1942), apresenta menor variância.

Obtém-se assim a seguinte equação para o cálculo de  $m$  em um intervalo de resultados AB:

$$m = \frac{\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(V_0)_A}\right)\right) - \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(V_0)_B}\right)\right)}{(\ln(\sigma_a) - \ln(\sigma_b))} \quad (3.25)$$

Sendo plotado um gráfico onde a ordenada seja dada pela expressão  $\ln[\ln(1/1-F(V_0))]$  e a abscissa por  $\ln(\sigma/\sigma_0)$ , pode-se concluir que o módulo  $m$  representa a inclinação de uma reta interpolada a partir dos pontos obtidos neste gráfico, Askeland et al, (2011), Green , (1998) e Matheus, (1994), onde,  $F(V)$  é obtido pelo método da posição relativa,  $\sigma_a$  e  $\sigma_b$  obtidos pela equação (3.25) e  $m$  é representado pela inclinação da reta definida pelos pontos AB, como mostra a Figura (3.36).

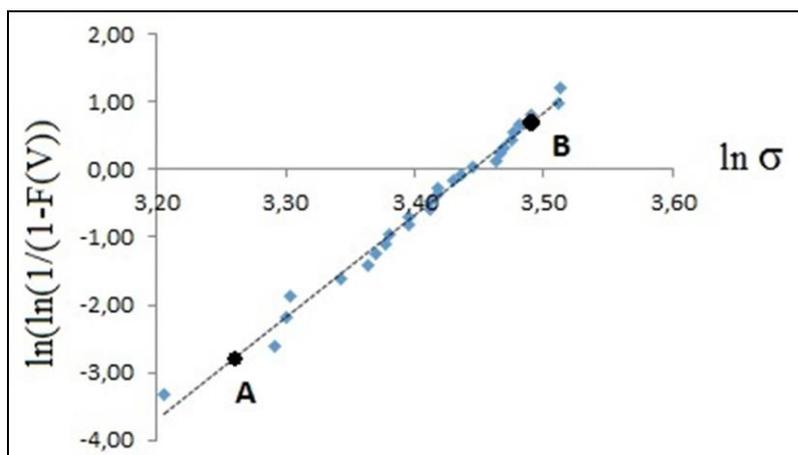


Figura 3.36 - Exemplo de gráfico de  $\ln(\ln(1/(1-F(V))) \times \ln \sigma)$ , Rabahi, (2010)

De acordo com Hull e Clyne (2005), existe uma relação aproximada direta entre Weibull, a média e o Desvio Padrão, na grandeza avaliada. Segundo o estudo, o Módulo de Weibull  $m$  obedece a equação  $m \approx (1,2 \times X)/s$ , Onde,  $X$  é a média das Tensões de Ruptura  $\sigma_u$ , e  $s$  é o desvio padrão. Esta relação foi verificada por Hull e Clyne (2005), para ensaios de filamentos de fibras. Assim a partir da equação (3.24):

$$m \approx \frac{1,2 \cdot X}{s} \quad (3.24)$$

Sendo  $CV$  o coeficiente de variação, pode-se escrever que:

$$CV = \frac{s}{X} \quad (3.25)$$

Assim:

$$m \approx \frac{1,2 \cdot X}{CV \cdot X} \quad (3.26)$$

Portanto:

$$m \cdot CV \approx 1,2 \approx \text{Constante} \quad (3.27)$$

Caso exista essa relação aproximadamente constante para o material analisado no presente estudo, esta constante poderá ser obtida a partir da equação (3.27)

### 3.5 - ANÁLISE MICROGRÁFICA

As propriedades de um compósito são provenientes de fatores como a geometria da fase dispersa, distribuição, orientação e também da compatibilidade interfacial entre os constituintes da mistura. Assim, é importante que se conheça a interface entre os componentes de um compósito, para o melhor entendimento de seu comportamento mecânico (Silva, 2014). A necessidade de haver uma interação entre os materiais que foram unidos pela matriz polimérica, está no fato de que todos os componentes devem trabalhar juntos respondendo aos esforços físicos do meio. Por isso, é muito importante conhecer as propriedades químicas e físicas dos diferentes materiais como, as propriedades das interfaces destes materiais (Neto et al, 2007).

A adesão de dois materiais está associada ao estabelecimento de interações que podem ser dos tipos: ligações covalentes, forças de van der Waals, ligações de hidrogênio e interação eletrostáticas. A natureza destas interações está associada à afinidade química entre a matriz e a fase dispersa. A compatibilidade destas duas fases é fator fundamental para a caracterização do composto final, (Silva, 2014).

A evidência de vazios e o comportamento da interface, partícula de carga e matriz polimérica, poderão ser observados por Microscópio Eletrônico de Varredura, MEV, para um melhor entendimento sobre as ações dos microcomponentes no resultado final das propriedades mecânicas analisadas, conforme os observados na Tese de Doutorado de Silva, (2014), onde foi possível observar o vazio deixado pelo desprendimento de fibras após o rompimento do CP.

O MEV utiliza um sistema de microanálise eletrônica, que consiste na medida de raios-X característicos emitidos de uma região microscópica da amostra bombardeada por um feixe de elétrons. As linhas de raios-X característicos são específicas da estrutura eletrônica dos átomos da amostra e, o seu comprimento de onda ou sua energia podem ser utilizados para identificar o elemento que está emitindo a radiação, Dedavid et al, (2007). Esse sistema produz dois tipos básicos de micrografias, (i) Elétrons Retroespalhados (BED), que além da topografia, também se obtém uma imagem de composição (contraste em função do número atômico dos elementos presentes na amostra). (ii) Elétrons Secundários (SED), onde contraste na imagem é dado, sobretudo, pelo relevo da amostra.

Serão realizadas Micrografias com intuito de comparar o comportamento entre partículas de carga mineral e partículas de carga reciclada na matriz polimérica. Essas análises serão executadas no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) na UFG.



Figura 3. 37 - Amostras retirada dos CPS na região da fratura, pós ensaios de flexão  
Para melhor obtenção das micrografias se faz necessário a limpeza por ultrassom para retirada das micropartículas das superfícies que foram submetidas ao corte e lixamento, figura (3.37), para esse procedimento é utilizado o equipamento da Eco-sonics mantido por 10 min a alta frequência. Conforme Figura (3.38).



Figura 3. 38 - Equipamento de Ultrassom para limpeza das amostras  
O equipamento a ser utilizado é um MEV de modelo JSM-IT300, sendo que as amostras deverão ser metalizadas e montadas em dispositivo próprio conforme Figura (3.38).

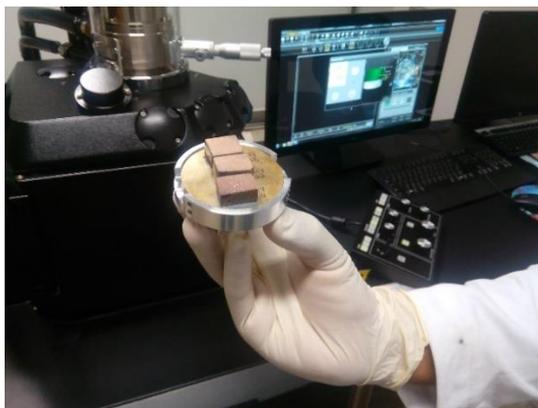


Figura 3. 38 - Montagem das amostras em dispositivo próprio para análise micrográfica  
Após esta preparação a amostra é colocada em uma câmara de vácuo conforme Figura (3.39).



Figura 3.39 - Dispositivo colocado em Câmara de Vácuo para análise.

Após todos os procedimentos de preparação a amostra é então analisada em pontos discretos na superfície de moldagem e na seção de ruptura para avaliação da microestrutura do compósito, conforme figura (3.40).

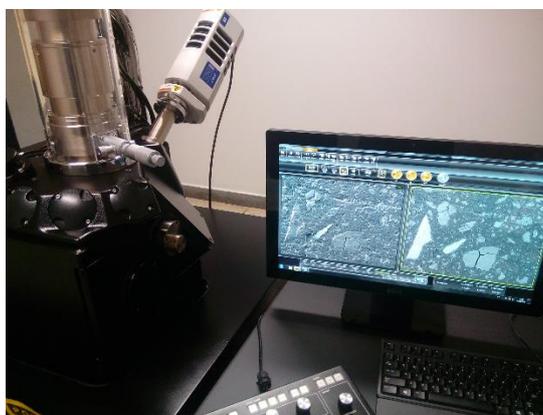


Figura 3.40 - Análise micrográfica sendo realizada em MEV, no CRTI na UFG

## 4 - RESULTADOS OBTIDOS.

Os resultados obtidos, são provenientes da síntese de várias etapas do estudo, podendo ser divididos em: (i) Características Gerais dos CPs Confeccionados; (ii) Características Geométricas; (iii) Comportamento Elástico e de Ruptura em Flexão, e (iv) Análises Macro e Micrográficas.

### 4.1 - CARACTERIZAÇÃO DA CARGA UTILIZADA

Nas amostras obtidas para este estudo, as características de comportamento do rejeito e pedra calcária ( $\text{CaCO}_3$ )<sup>1</sup> são similares, tendo inclusive a presença de  $\text{CaCO}_3$  nos rejeitos, conforme a análise de Difração de Rx realizadas, (Figuras 4.2 e 4.3). O componente principal do mármore natural e pedra calcária, é basicamente o  $\text{CaCO}_3$ , Sampaio e Almeida, (2005).

Realizada, no Laboratório CRTI, na universidade Federal de Goiás, a análise de Difração de RX, permitiu conhecer as fases minerais cristalinas presentes na amostra. Para constatação dos componentes e determinação de suas composições, essas análises podem ser observadas nas Figuras (4.2 a 4.4).

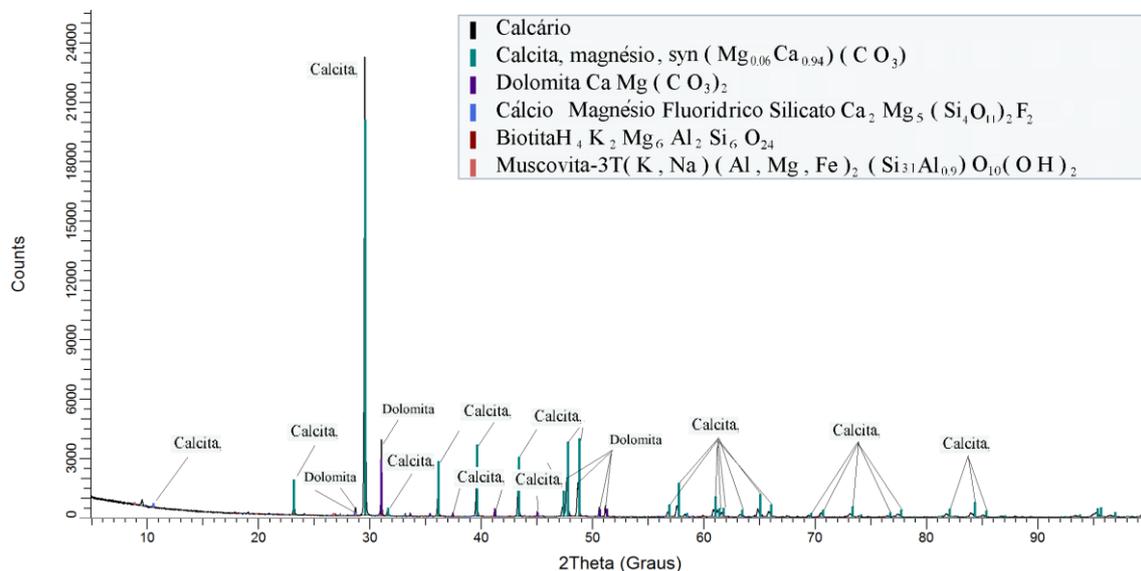


Figura 4. 1 - Amostra de Calcário em Análise de difração de Rx, Realizada no Laboratório do CRTI, na Universidade Federal de Goiás

A presença de Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) é predominante na amostra analisada, com algumas contagens de grãos Dolomíticos ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). Já na amostra de Rejeitos ainda existe a

<sup>1</sup> A Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) é o principal componente da matéria prima calcária utilizada neste experimento, conforme análise de DRX, Figura 4.2

predominância de Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Há também a presença significativa de outros minerais, como a Dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), Magnetita Magnésiana ( $(\text{Fe}_{0,8}\text{Zn}_{0,2})(\text{Fe}_{1,2}\text{Ni}_{0,2}\text{Mg}_{0,6})\text{O}_4$ ), além de outros em quantidades bem menores.

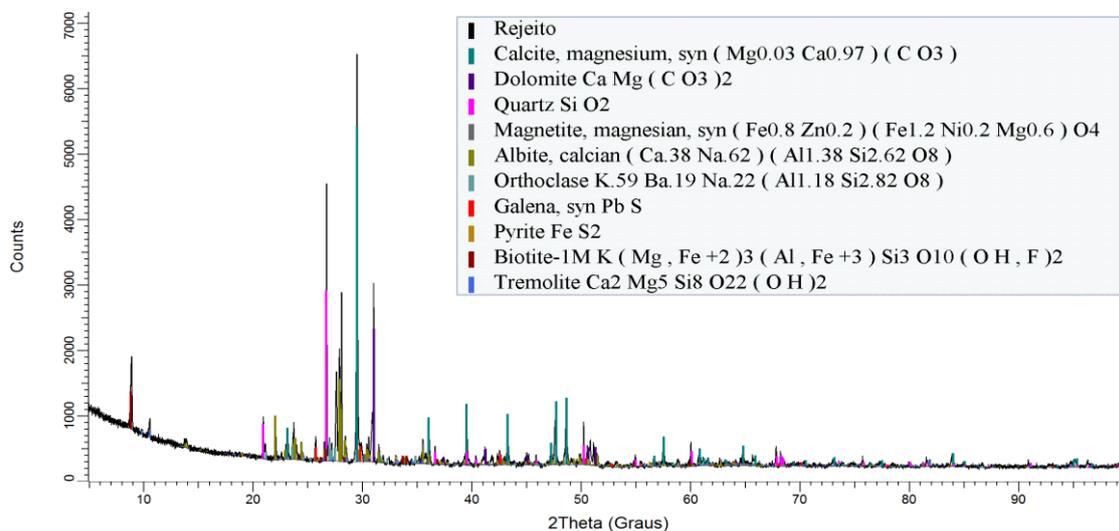


Figura 4. 2 - Amostra de Rejeito de marmoraria em Análise de Difração de Rx, no Laboratório CRTI, na UFG

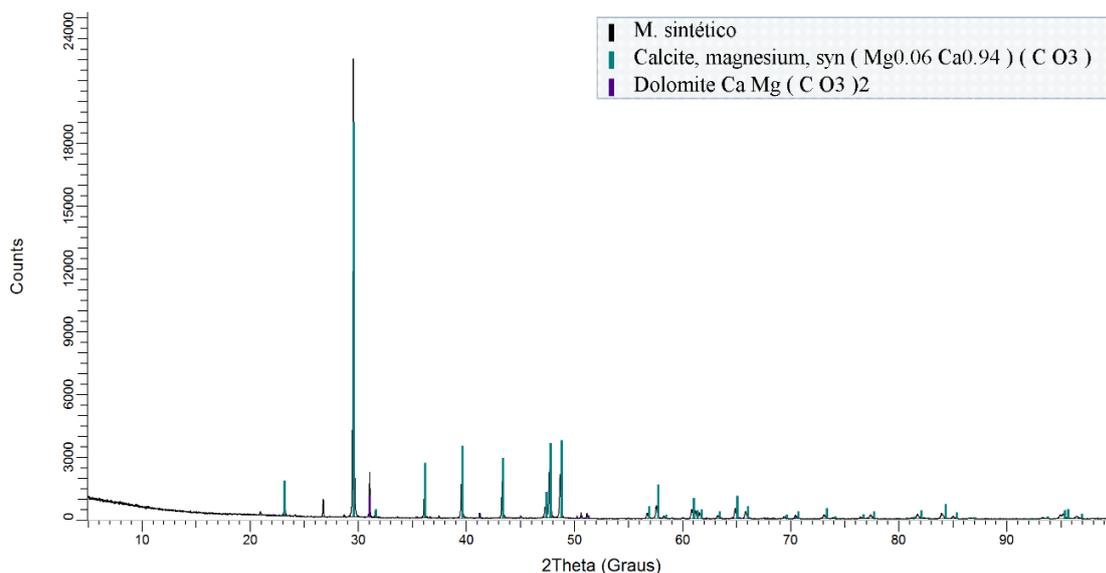


Figura 4. 3 - Amostra de Mármore Sintético em Análise de difração de Rx, Realizada no Laboratório do CRTI, na Universidade Federal de Goiás

Já a amostra de Mármore Sintético, teve como principais componentes a Calcita em maior quantidade, relativamente, e a Dolomita em intensidade bem menor.

## 4.2 - CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA CONFECCIONADOS

Foram Avaliados 19 grupos ((16 ao 27), 32, 39, (40 ao 44) e ara) com variações de composição química e proporções em percentuais em massa entre os constituintes, conforme apresentado na Tabela 4.1

Tabela 4. 1 - Características dos grupos de CPs confeccionados

<b>N° do Grupo - Composição e Proporções em massa da Carga</b>	<b>Granulometria da Carga dividida</b>	<b>Resina massa (g) - Fabricante</b>	<b>CPs - Ensaiaados</b>
8-Rejeito 100%	20/30/50/100	700- Reichold	30
9-Calcário 100%	20/30/50/100	700- Reichold	33
15-Sintético 100%	20/30/50/100	700- Reichold	30
16- 90%Calcário+10%Sintético	20/30/50/100	700-ARA	35
17- 80%Calcário+20%Sintético	20/30/50/100	700-ARA	31
18- 70%Calcario+30%Sintético	20/30/50/100	700 -ARA	30
19- 60%Calcario+40%Sintético	20/30/50/100	700-ARA	30
20- 50%Calcario+50%Sintético	20/30/50/100	700-ARA	34
21- 40%Calcario+60%Sintético	20/30/50/100	700-ARA	35
22- 30%Calcario+70%Sintético	20/30/50/100	700-ARA	35
23'- 20%Calcario+80%Sintético	20/30/50/100	700-ARA	30
24'- 10%Calcario+90%Sintético	20/30/50/100	700-ARA	30
25- Calcario 100%	20/30/50/100	700-ARA	33
26- Rejeito 100%	20/30/50/100	700-ARA	35
27-Sintético 100%	20/30/50/100	700-ARA	30
39-Sintético 100% Rec. 1º ciclo	20/30/50/100	875-ARA	35
43-Sintético 100% Rec. 2º ciclo	20/30/50/100	875-ARA	35
42-Sintético 100% Rec. 3º ciclo	20/30/50/100	875-ARA	31
44-Sintético 100% Rec. 4º ciclo	20/30/50/100	875-ARA	35
41- Calcario 100%	20/30/50/100	875-ARA	32
32- Rejeito 100% Rec. 2º ciclo	20/30/50/100	875-ARA	30
Resina Pura ARA			13

As proporções de utilização destas matérias primas são em massa. Para formulação primária do Mármore Sintético adotou-se: 700g (20%) de resina; e 2.800g (80%) de carga mineral, dividida em 4 partes iguais de 700g (20%) para cada granulometria (20/30/50/100). Os valores 20/30/50/100 referem-se às malhas adotadas no peneiramento da carga mineral ao incorporá-la à massa. Em todos os CPs há partes iguais de carga com estas 4 gradações de malha.

Nas formulações que envolvem reciclados foi realizada a compensação através do peso específico de cada matéria prima, uma vez que a densidade dos reciclados é diferente a cada ciclo, em função da presença de polímeros nos mesmos. A proporção em peso foi

corrigida para que o volume permanecesse o mesmo, preenchendo todas as cavidades do molde sem sobras ou falta de massa. A fabricação é realizada em molde aberto conforme, Figura (4.4). Existe uma perda natural de material durante o processo de moldagem, parte dela devido à volatilização de componentes de resina, o que é comum a todas as formulações de resinas baseadas em polímeros termofixos, mas não implicando em alterações de formulação.



Figura 4. 4 - Volume de massa sendo espalhado no molde subdividido em Filetes de 1000mm x 40mm)

Os corpos de prova foram executados em número de 35 CPs por formulação, sendo ensaiados um mínimo de 30 CPs por grupo. No total, das cerca de 900 vigas confeccionadas, foram disponibilizados para ensaio 874 CPs. Os grupos foram numerados a partir do número 1, no entanto os primeiros grupos, 1 a 7 foram considerados impróprios para análise tendo em vista que sua formulação inicialmente com 15 % de resina em massa, e carga distribuída entre granulometrias, 20 - 33%, 50 - 33% e 100 - 33%. Com essa formulação a massa produzida teve dificuldades de compactação e desaeração, o resultado foi descartado (lembrando que estes CPs serão reaproveitados na próxima etapa de reciclagem).

A formulação foi alterada para 20% de resina em massa, e obteve-se o primeiro grupo apto a ser ensaiado. O Grupo 3, com formulação adequada, 20/30/50/100, 25% cada, para resíduos de pedras naturais, foi compactado manualmente sem auxílio de equipamento vibratório, e servirá de referência para análise da influência da vibração no processo de moldagem. Já no quarto grupo foi realizada alteração na granulometria, na expectativa de melhora da compactação, sem sucesso. Retornando, no grupo 5, então às granulometrias de 20/30/50/100, 700g de cada uma, e 700g resina poliéster insaturada Polylite do fabricante Reichhold. A quantidade utilizada, em peso, para rejeitos de pedras

ornamentais (rejeitos de marmorarias), será a mesma que a utilizada para o calcário como carga mineral, sendo que os dois materiais têm densidades semelhantes.

Nos grupos 7 e 8 houve alteração no processo de mistura alterando-se a ordem de acrescentar a carga, nas primeiras misturas, a carga era acrescida toda de uma só vez, após realizados as pesagens individuais de carga. Somente no grupo 8 encontrou-se a melhor ordem de acréscimo da carga, e se pode então iniciar, a partir deste grupo o processo de análise comparativa, porém ainda nos grupos 8 e 9 se utilizou uma resina poliéster do fabricante Reichhold, diferente dos demais grupos que se seguem, ainda que com as mesmas especificações de aplicação, as propriedades mecânicas possuíam valores diferentes segundo seus fabricantes, conforme Anexo A, Tabela (a.1). A molhabilidade da carga é substancialmente melhorada ao se acrescentar primeiro as granulometrias finas e em seguida as de malhas mais grossas, com intervalo de 1 minuto entre um acréscimo e outro. Estes padrões de misturas foram utilizados no restante dos grupos.

Foi alcançado então um padrão de fluidez do composto no molde, satisfatório, e é esperado que quanto melhor a fluidez da massa no molde, obtenha-se uma melhor compactação e conseqüente melhora na tensão de ruptura do material. Com a formulação acertada para os rejeitos (grupo 8), procedeu-se à primeira formulação (grupo 9) de material virgem ou pedra calcária.

A partir do grupo 10 a resina poliéster foi alterada de fabricante, por dificuldades de obtenção de resina apropriada e de referências idênticas ao primeiro lote, correndo-se o risco de se perder a padronização. Foi realizada nova encomenda junto à empresa Redelease, que se comprometeu em fornecer a matéria prima com a mesma padronização e especificação. Para esse acompanhamento foram fornecidos todos os boletins técnicos (Anexo A) dos materiais adquiridos na empresa, com informações suficientes de composição, características de secagem e propriedades mecânicas, para garantir condições de análise do produto final. A partir destas informações da resina pura, algumas características da resina com carga mineral foram verificadas. Por exemplo o tempo de gel<sup>2</sup>, informado pelo fabricante da resina ARA 3.7 é de 10 a 15min, com 1% de catalisador a 25°C. Já os resultados obtidos do tempo de gel da massa dos grupos

---

<sup>2</sup> Tempo de gel é tempo de gelatinização da resina, a partir deste ponto a polimerização já se encontra em fase de endurecimento da massa e deixa de ser moldável, não sendo mais possível a compactação por vibração.

analisados, foi em média entre 25 a 30 min, essa diferença se deve à presença da carga que retarda a polimerização, de uma forma geral.

Finalizada esta etapa das formulações e adequação para os rejeitos pedras naturais (rejeitos), e pedra calcária, deu-se início às formulações dos resíduos sintéticos (sintéticos), esses com particularidades diferentes dos primeiros lotes. A diferença de densidade entre os dois materiais, pedras naturais e pedras sintéticas, é o primeiro cuidado a se ter na formulação desse grupo.

Tomando-se como parâmetro a formulação ideal obtida anteriormente, de 700g de resina e 2800 g de carga divididas em quatro granulometrias em iguais proporções, de 700g cada. E, levando-se em consideração a densidade dos materiais envolvidos: 2,8 Kg/l (ou g/cm<sup>3</sup>) para rejeitos de pedras naturais; e 1,8 Kg/l para resíduos sintéticos. Encontra-se então a proporção de 485g de cada, definindo a granulometria utilizada na fabricação do grupo 11, que foi a primeira formulação do mármore sintético.

O resultado deste experimento não foi satisfatório, devido à dificuldade na fluidez da massa pelo molde, pela presença de rejeito sintético, uma vez que existe cerca de 20% de material polimérico presente na composição dos rejeitos sintéticos. Ainda neste experimento detectou-se a presença residual de catalisador, remanescente do processo de polimerização do primeiro ciclo de fabricação, o que provocou uma secagem prematura. Impedindo, somente neste caso, a obtenção de 30 CPs. Foram aproveitados somente 20 CPs, tendo essas grande incidência de bolhas (vazios). Para os grupos 12 e 13 tentou-se alternativas diferentes de granulometrias, bem como a diminuição gradual do percentual de catalisador, de acordo com as formulações para massa de material sem catalisador residual. Chegando-se a partir de então a um valor de 70% do catalisador, utilizado normalmente. Esse percentual permitia um tempo de gel entre 25 e 30min.

A partir do grupo 16, que foi considerado como padrão ideal para os próximos grupos, as granulometrias 20/30/50/100, na correspondência de 700g de cargas naturais (seja de rejeitos ou de CaCO<sub>3</sub>), para 450g de rejeitos sintéticos, obteve-se o total preenchimento do molde, permitindo assim um volume constante de massa produzida entre os grupos seguintes.

Obtida a formulação ideal entre todos os materiais propostos na utilização como cargas de enchimento, e sendo essa formulação de granulometria e volume comuns, executou-

se a partir do grupo 16 as variações de inserção de rejeitos sintéticos em massa de material virgem. Gradualmente, de 10% em 10%, até se alcançar 100% de material reaproveitado. Podendo assim permitir uma análise mais precisa sobre a influência do resíduo sintético em adições graduais. Após alcançar 90% de sintético e 10 % de carga natural, repetiu-se os ensaios iniciais, 8 e 9 pois estes teriam sido executados com resina proveniente de outro fabricante. Bem como o experimento 15 no qual houve uma pequena variação do modo padrão de mixagem para os próximos grupos, conforme Tabela (4.1).

A partir do Grupo 28, já após a primeira execução dos ensaios de flexão até o grupo 27, conforme Tabela (4.4), procedeu-se a confecção dos próximos CPs utilizando, como matéria prima em forma de carga, os CPs já ensaiados. Levando-se em consideração que a nova carga, após britada e moída, teria peso específico diferente dos primeiros experimentos, foram necessárias algumas tentativas de alteração de composição, pois esses grupos (grupos 28 a 30) não apresentaram massa satisfatória para uma boa moldagem. As tentativas na alteração de granulometrias e percentuais entre resina e carga foram acertadas no grupo 31 para Calcário puro, no grupo 32 para os rejeitos de marmorarias de 2º ciclo de reciclagem<sup>3</sup>, e no grupo 34 para o mármore sintético, também no 2º ciclo de reciclagem<sup>4</sup>, todos com 20% em massa de resina. Só foi possível alcançar boa fluidez da massa no molde dos grupos, aumentando o tempo de mixagem e de vibração na moldagem.

Para garantir a boa execução das moldagens, sem perder os parâmetros já estabelecidos anteriormente, nos primeiros grupos, optou-se por aumentar o teor de resina de 20% para 25%, conforme Rabahi (2010). Este é também um índice utilizado em experimentos de mármore sintético. Ao aumentar o teor de resina, já prevendo um aumento na dificuldade de fluidez da massa na medida em que se reutiliza o mármore sintético como carga, foi então necessário a confecção de novos grupos com as cargas primárias, de Calcário e Mármore sintético e, conforme os grupos 25 e 27, respectivamente, agora com o teor de 25% de resina, para fins comparativos.

---

<sup>3</sup> Os ciclos de reciclagem para os Rejeitos são diferentes dos ciclos para a reciclagem do Mármore Sintético, uma vez que na primeira fabricação o Mármore Sintético é produzido de matéria prima virgem (Calcário), sendo que os rejeitos produzidos pela primeira vez ainda como 100% de carga mineral já é produto de resíduos sólidos de marmorarias.

<sup>4</sup> O 2º ciclo de reciclagem do Mármore Sintético corresponde, em relação à presença de cargas minerais, ao 3º ciclo de reciclagem de Rejeitos.

Estabelecido o percentual de Resina em 25% na composição, foi possível então a obtenção, em relação ao mármore sintético, do 1º ao 4º ciclo de reciclagens. Nos grupos 39 e 41, com matérias primas provindas do Calcário e Mármore Sintético, respectivamente. Os grupos: (i) 42, 3ºciclo (provindo dos grupos 36, 15 (sintético de 1ºciclo); e 43, 2º ciclo (utilizando grupo 27(sintético de 1ºciclo)), e 4ºciclo (reutilizando 40, 37, 33 (sintético de 1ºciclo)), fecharam os últimos grupos confeccionados para a elaboração deste estudo.

A cada tentativa malsucedida de confecção de grupos, todos eram devidamente registrados e ficavam à disposição para britagem e moagem para utilização em ciclos subsequentes, todas as composições e descrições dos experimentos estão na Tabela (4.3).

### **4.3 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E FÍSICAS**

#### **4.3.1 - Caracterização dos CPs.**

Foram realizadas em todos os CPs, antes da execução dos ensaios, oito medições de espessura  $t$  (mm) conforme Figura (4.5), largura do CP  $b$  (mm), pesagem da *massa* (g), comprimento  $l$  (mm); e marcações (secção transversal central) para aplicação de força pelo atuador central, Figura (4.7). O controle dimensional dos CPs, dá suporte e subsidia todo estudo, tendo em vista que a espessura dos mesmos varia, daí a importância de se padronizar estas caracterizações.

A variação de espessura indica algum padrão de interferência no comportamento de suas características geométricas, em função do nível de vibração ao qual cada CP foi submetido na fabricação. Apesar dos CPs terem sido submetidos a uma vibração com fonte constante e no mesmo ponto sempre, conforme Figura (4.6), a distribuição da intensidade das ondas, em função dos modos de vibração, pode provocar diferentes excitações em diferentes pontos do molde. Caso isso tenha de fato ocorrido, poderá haver padrões de compactação similares em diversos grupos na mesma posição da matriz do molde.

A produção dos CPs ocorre em filetes dispostos em cinco partes no molde, o endereçamento do CP no molde, que varia como em uma matriz de 5 colunas, de 1 a 5, e

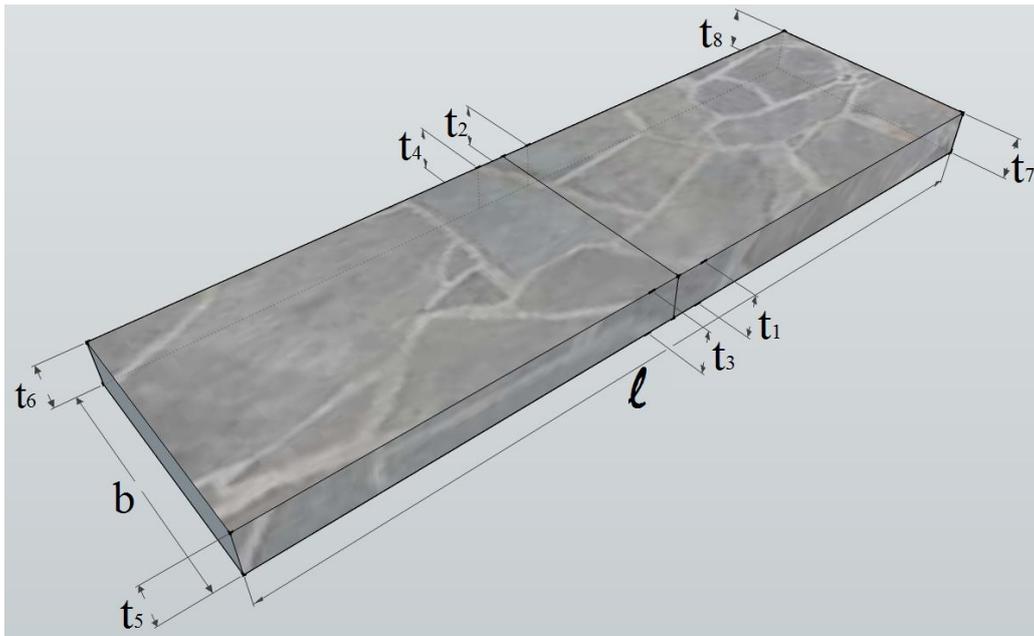


Figura 4. 5 - Parâmetros de medição

sete linhas, de A a G, e permite identificar a qualquer tempo ou etapa do processo qual foi a posição na qual houve a moldagem da peça, conforme Figura (4.6).

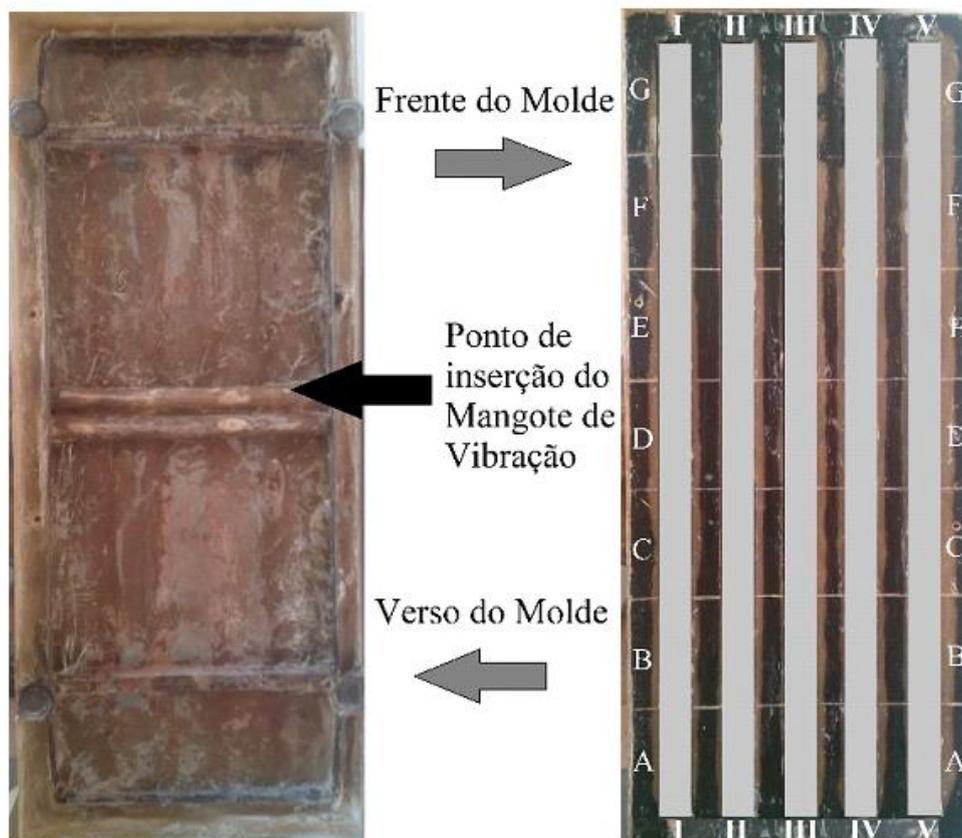


Figura 4. 6 - Molde para fabricação dos CPs - Distribuição dos CPs

### 4.3.2 - Execução das medições.

A medição dos CPs foi executada com paquímetro da marca Mitutoyo analógico de resolução 0,02mm e paquímetro digital da mesma marca com resolução de 0,01mm, prevalecendo, portanto, a menor resolução de 0,02mm. As medições foram realizadas em 10 pontos, sendo 8 de espessura  $t_1$  a  $t_8$  (mm), largura do CP  $b$  (mm) e comprimento  $l$  (mm), foi utilizada balança de resolução de 0,1g na pesagem dos CPs, estas medidas estão dispostas em tabelas no Anexo C.

Tabela 4. 2 - Dados de caracterização do grupo 8.

	medida de espessura $t$ (mm)									Media total $t_t$ (mm)	comp. $l$ (mm)	Largura $b$ (mm)	Massa (g)
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_{\text{medio}}$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$				
A1	8,02	8,06	8,02	8,06	8,04	7,58	8,18	8,24	8,82	8,12	144,14	39,22	100,30
B1	7,78	8,16	7,78	8,16	7,97	7,62	7,88	7,52	8,28	7,90	141,40	39,44	91,60
C1	7,56	8,02	7,60	8,06	7,81	7,58	7,72	7,60	7,94	7,76	141,78	39,24	90,60
D1	7,58	7,54	7,68	7,66	7,62	7,42	7,80	7,70	7,88	7,66	142,16	39,30	90,70
E1	7,36	8,28	7,36	8,28	7,82	7,96	8,88	7,44	7,86	7,93	140,54	39,34	94,10
F1	7,78	8,74	7,78	8,78	8,26	7,38	8,08	8,08	8,82	8,18	143,06	39,36	97,00
G1	7,18	8,16	7,12	8,18	7,67	7,16	7,98	7,38	8,06	7,65	141,26	39,24	87,40
A2	7,28	7,16	7,24	7,16	7,20	7,26	7,28	7,48	7,20	7,26	144,46	40,08	89,00
B2	8,20	7,92	8,44	7,92	8,06	8,64	8,04	7,40	7,32	7,99	141,20	39,98	95,20
C2	8,58	7,94	8,58	7,96	8,27	8,16	8,04	8,66	8,16	8,26	143,78	40,18	100,30
D2	8,08	7,96	8,08	7,96	8,02	9,02	8,88	8,28	7,78	8,26	141,78	40,16	98,90
E2	9,72	9,42	9,72	9,42	9,57	9,68	9,42	9,04	8,74	9,40	140,66	40,28	110,80
F2	8,68	8,70	8,80	8,70	8,70	8,06	7,92	9,62	9,34	8,73	142,18	39,94	104,90
G2	7,54	7,66	7,48	7,62	7,58	7,74	7,64	7,98	7,88	7,69	141,32	39,86	91,80
A3	8,40	8,50	8,40	8,50	8,45	7,72	7,90	8,88	8,94	8,41	143,42	39,36	101,00
B3	8,04	8,56	7,98	8,56	8,30	9,12	9,46	7,88	8,56	8,52	141,44	39,56	98,10
C3	9,04	9,62	9,04	9,70	9,33	8,54	9,24	9,16	9,54	9,24	142,94	39,34	110,20
D3	7,88	8,44	7,88	8,44	8,16	7,58	8,42	8,54	9,14	8,29	143,68	39,26	98,30
E3	7,64	8,60	7,70	8,70	8,15	7,56	8,20	7,78	8,56	8,09	142,04	39,46	95,90
F3	6,88	7,64	6,92	7,64	7,28	7,38	8,12	7,36	8,12	7,51	143,32	39,42	89,40
G3	7,94	8,54	8,06	8,52	8,29	8,52	9,22	7,62	8,12	8,32	142,06	39,32	97,70
A4	8,16	8,32	8,16	8,32	8,24	7,78	8,28	8,26	8,62	8,24	142,70	39,70	98,50
B4	7,98	8,56	7,98	8,52	8,25	8,52	8,88	7,72	8,18	8,29	139,98	39,68	95,60
C4	9,10	9,38	9,26	9,38	9,32	8,74	9,08	8,74	9,24	9,12	143,18	39,80	110,20
D4	8,00	8,42	8,06	8,50	8,24	7,90	8,12	8,74	9,08	8,35	141,04	39,68	98,70
E4	7,44	7,90	7,44	7,90	7,67	7,24	7,68	8,22	8,08	7,74	143,48	39,48	92,30
F4	7,00	7,84	6,96	7,88	7,42	7,34	7,56	7,36	7,82	7,47	141,64	39,46	87,00
G4	7,36	7,64	7,28	7,64	7,50	7,84	7,92	7,52	7,56	7,60	143,38	39,52	89,30
A5	9,00	8,60	9,22	8,54	8,80	8,58	7,68	9,46	9,06	8,77	143,00	39,96	107,00
B5	7,96	7,12	7,96	7,20	7,58	7,52	6,88	8,38	7,64	7,58	140,78	40,14	90,50
C5	7,38	6,82	7,38	6,80	7,10	7,48	6,62	7,86	7,46	7,23	141,38	40,24	86,20
D5	6,76	6,54	6,76	6,54	6,65	6,98	6,92	7,40	6,74	6,83	142,18	40,14	82,30
E5	7,38	7,36	7,38	7,36	7,37	7,34	7,04	7,02	6,96	7,23	142,44	40,20	88,70
F5	7,82	7,80	7,68	7,80	7,80	8,62	8,22	7,32	7,14	7,80	142,42	40,42	93,10
G5	7,60	7,22	7,62	7,24	7,42	7,70	7,38	7,38	6,96	7,39	141,86	40,22	90,50

Após a realização das medidas dimensionais dos CPs foi possível a obtenção da espessura média  $t$  (mm) na seção de ruptura, a espessura media total  $t_t$  (mm) e a densidade

aproximada, levando-se em consideração as dimensões volumétricas do CP, ( $b \times l \times t$ ) ( $\text{mm}^3$ ). As tabelas com todos dados estão dispostas no Anexo C, conforme o exemplo da Tabela (4.2)

#### 4.4 - RESULTADO DOS ENSAIOS DE FLEXÃO

Os testes foram realizados nas máquinas universais MTS 809, no Laboratório de Ensaios do ENM, localizado no bloco SG09, da Faculdade de Tecnologia na Universidade de Brasília. Tiveram a execução realizada em um período aproximado de nove meses, a contar da preparação do suporte de ensaio de flexão de três pontos, convencional, que foi fabricado em Goiânia, e aprimorado no laboratório de usinagem no SG09, Figura (4.7). Como o número de ensaios era substancial, cerca de 900, foram estabelecidos alguns parâmetros de segurança que permitissem a utilização segura e repetitiva da máquina universal de ensaio mecânico MTS 809 - 05, como a velocidade de avanço fixa, de 1 mm/min.



Figura 4. 7 - Confecção de suporte de ensaio de flexão de três pontos

Os parâmetros de utilização para esses ensaios, exigiram a troca da célula de carga que normalmente se utiliza neste equipamento, que é de 100 KN, por uma com capacidade máxima de 5 KN, isso permitiu uma resolução melhor dos esforços aplicados, porém atenção redobrada no manuseio. Foi necessário ainda elaboração de recipiente de contenção de partículas residuais, gerados pela ruptura dos CPs, que pudessem prejudicar o equipamento, que possui o atuador de força (cilindro hidráulico) na parte inferior exatamente abaixo do suporte de ensaio, conforme Figura (4.8)



Figura 4. 8 - Máquina Universal de Ensaio Mecânicos MTS 09 - 05

Foram executados inicialmente ensaios com suporte fixo, posteriormente, instalado o suporte articulado. A descrição dos ensaios, e o tipo de suporte (articulado ou fixo) utilizado nos ensaios está descrito na Tabela (4.3).



Figura 4. 9 - Recipiente de contenção, essencial para ruptura de materiais que produzem pequenas partículas abrasivas.

Tabela 4. 3 - Quantidade ensaios por grupo, diferenciadas por tipo de suporte

<b>Grupo</b>	<b>Tipo de Suporte</b>		<b>Total de ensaios</b>
	<b>Articulado</b>	<b>Fixo</b>	
3-Rejeito 100% (acerto de formulação)	30	3	33
5-Rejeito 100% (acerto de formulação)	35	0	35
7-Rejeito 100% (acerto de formulação)	30	0	30
8-Rejeito 100% (Resina diferente)	30	0	30
9-Calcário 100% (Resina diferente)	30	0	30
11-Sintético 100% (acerto de formulação)	20	0	20
12-Sintético 100% (acerto de formulação)	14	20	34
14-Sintético 100% (acerto de formulação)	15	20	35
15-Sintético 100% (Resina diferente)	30	0	30
<b>Total Não Analisados(formulas diferentes)</b>	<b>234</b>	<b>43</b>	<b>277</b>
16- 90% Calcário+10% Sintético	15	20	35
17- 80% Calcário+20% Sintético	11	22	33
18- 70% Calcário+30% Sintético	30	0	30
19- 60% Calcário+40% Sintético	30	0	30
20- 50% Calcário+50% Sintético	16	18	34
21- 40% Calcário+60% Sintético	15	20	35
22- 30% Calcário+70% Sintético	15	20	35
23- 20% Calcário+80% Sintético	30	0	30
24- 10% Calcário+90% Sintético	10	20	30
25- Calcário 100%	18	15	33
26- Rejeito 100%	15	16	31
27- Sintético 100%	30	0	30
32-Rejeito 100% Rec. 2º ciclo	30	0	30
39-Sintético 100% Rec. 1º ciclo	35	0	35
41- Calcário 100%	32	0	32
42-Sintético 100% Rec. 3º ciclo	31	0	31
43-Sintético 100% Rec. 2º ciclo	35	0	35
44-Sintético 100% Rec. 4º ciclo	35	0	35
Resina Pura ARA	3	10	13
<b>Total Analisados (mesma formulação)</b>	<b>436</b>	<b>161</b>	<b>597</b>
<b>Total Geral</b>	<b>670</b>	<b>204</b>	<b>874</b>

O Grupo “ara” refere-se ao grupo de resina poliéster insaturada que foi catalisada sem nenhuma carga para confirmação das informações técnicas fornecidas pelo fabricante Ara-Aschland.

Alguns Grupos que foram confeccionados para acertos de formulação ou com resinas de fabricantes diferentes, não terão seus dados catalogados neste estudo tendo em vista o grande número de variáveis que poderiam interferir nos resultados finais, dificultando assim um estudo comparativo entre as propriedades que se deseja avaliar no presente trabalho, esses grupos estão em destaque na Tabela (4.3).

Em Resumo foram realizados 670 ensaios no suporte articulado e 204 em suporte fixo, totalizando 874 ensaios, desses somente 436 ensaios no suporte articulado e 161 em

suporte fixo, foram analisados em função da padronização na formulação dos CPs, totalizando 590 ensaios mecânicos de flexão de três pontos analisados, Tabela (4.3), sendo que desses serão realizadas análises comparativas entre os grupos para avaliação das propriedades (Resistencia Intrínseca  $\sigma_0$  e Modulo de Elasticidade  $E$ ) e processos.

A partir dos ensaios de flexão obteve-se a *força aplicada* e o correspondente deslocamento devido à *deflexão do CP*, na linha central de atuação de força do Suporte de Flexão, esses dois parâmetros caracterizam todo comportamento do CP.

Tabela 4. 4 - Dados obtidos dos ensaios (total de 35), do grupo 43 (Reciclagem de 2º ciclo), sendo 20 ensaios sem Desbaste e 15 com a superfície inferior desbastada.

Grupo 43 Rejeito 2ºciclo	Espessura Media t Seção de Rup. (mm)	Area Seção (mm <sup>2</sup> )	Força Ruptura (N)	Tensão Ruptura $\sigma_r$ (Mpa)	Flecha max (mm)	Força Parcial (N)	Flecha (mm)	PRÉ CARGA	E (Gpa)	Espessura Media total tt (mm)
A1	6,19	241,31	244,23	30,30	4,06	121,30	1,34	32,09	3,78	5,97
B1	6,28	245,05	301,08	36,24	3,65	121,70	1,26	31,05	2,96	6,65
C1	7,31	284,02	359,79	32,13	3,91	121,90	0,79	36,30	3,46	7,25
D1	7,11	277,50	341,69	32,08	4,07	120,20	0,86	34,08	3,50	7,00
E1	7,20	280,70	374,09	34,30	3,71	121,40	0,77	31,35	3,69	7,27
F1	7,03	274,17	333,56	32,06	4,43	121,40	0,98	29,81	3,72	6,73
G1	7,34	284,01	372,06	33,09	4,03	120,20	0,83	26,18	3,30	7,47
A2	6,49	259,76	301,56	33,15	3,58	121,60	0,91	36,99	4,50	6,23
B2	6,87	273,33	305,69	30,17	3,27	121,10	0,87	31,50	4,69	6,38
C2	6,87	274,80	288,04	28,26	2,71	121,60	0,81	33,35	4,41	6,62
D2	7,10	282,01	365,25	33,79	3,05	121,20	0,66	35,07	4,03	7,28
E2	6,43	257,20	282,33	31,62	3,67	121,90	1,17	28,69	4,73	5,84
F2	7,29	288,83	312,48	27,49	2,52	121,50	0,67	35,19	4,35	7,06
G2	7,43	294,28	394,70	33,45	3,30	121,70	0,67	34,38	3,31	7,76
A3	6,84	267,31	255,70	25,91	2,60	121,20	0,87	37,16	5,58	5,94
B3	6,65	260,81	262,17	28,00	3,48	121,20	1,11	33,90	4,21	6,08
C3	6,69	262,52	301,31	31,78	3,61	121,10	0,91	35,99	3,99	6,55
D3	6,90	270,62	330,79	32,82	3,47	121,30	0,83	32,55	3,75	6,99
E3	5,84	227,88	247,25	34,42	4,21	121,00	1,44	29,79	4,47	5,56
F3	6,53	255,06	279,14	31,05	3,68	121,70	1,10	31,91	3,98	6,28
G3	7,63	298,33	387,31	31,52	3,06	121,10	0,64	32,91	3,54	7,77
A4	6,80	270,06	306,38	30,90	3,29	121,30	0,90	29,60	4,91	6,28
B4	7,21	284,15	357,12	32,29	3,29	121,20	0,73	34,19	3,69	7,28
C4	6,36	250,39	287,87	33,49	3,54	121,80	0,99	34,24	3,37	6,80
D4	7,82	308,54	397,90	30,57	3,08	121,40	0,63	32,62	3,70	7,68
E4	5,69	223,37	195,77	28,52	3,57	121,80	1,70	31,54	3,37	5,74
F4	8,98	351,64	557,71	32,74	2,86	121,30	0,41	32,78	3,82	8,78
G4	8,61	339,41	499,64	31,67	2,93	121,30	0,43	32,48	4,01	8,49
A5	7,52	300,16	467,47	38,37	2,61	121,50	0,64	33,48	3,82	7,51
B5	7,49	299,87	408,62	33,71	3,53	121,00	0,73	25,25	3,65	7,51
C5	7,55	302,76	469,94	38,09	3,05	121,70	0,65	36,14	3,56	7,56
D5	7,96	319,20	429,94	31,35	3,55	121,65	0,60	31,90	3,40	8,02
E5	7,82	314,36	429,67	32,38	3,21	121,40	0,59	29,79	3,69	7,89
F5	7,00	280,32	332,01	31,36	3,89	121,43	0,91	32,14	3,21	7,10
G5	6,38	257,09	248,11	28,01	4,05	121,40	1,42	27,31	3,25	6,20

Através das metodologias já apresentadas, esses dados foram organizados em tabelas e retirada delas em três momentos principais, quais sejam, o início do ensaio, um ponto

intermediário (no início da deflexão) e o ponto final de ruptura. Assim foi construída a Tabela (4.4), que é exemplo de todas as outras, referentes a mais ensaios deste estudo, e estão disponíveis do Anexo C.

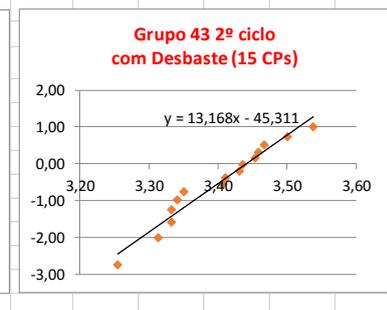
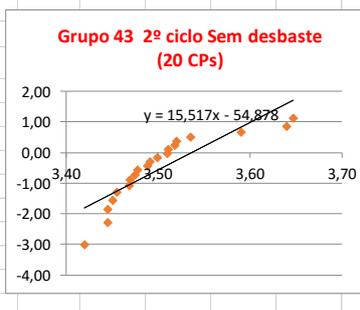
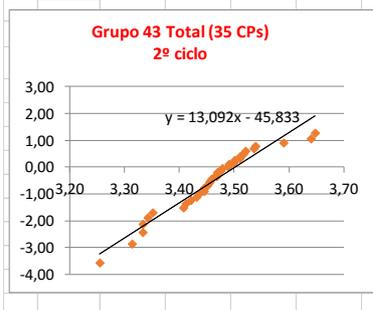
A partir então, dos dados coletados pela Tabela (4.4) e similares para cada Grupo, tendo já calculados o Módulo de Elasticidade  $E$ , e respectivo  $C.V.$ , passa se então aos cálculos para determinação do Módulo de Weibull,  $m$ . Inicialmente os dados são dispostos em ordem crescente, (método da posição relativa, Askeland e Fulay, (2011)), conforme Tabela (4.5), e encontra se a regressão linear da reta que melhor representa a tendência dos pontos plotados. O primeiro índice desta equação representa o módulo de Weibull, e a aplicação a 63%, representa a resistência intrínseca conforme descrito na metodologia de Weibull no item 3.4 em Metodologia Estatística de Weibull.

Tabela 4. 5 - Cálculo para obter-se o Módulo de Weibull  $m$  e a Resistência Intrínseca  $\sigma_0$ , através do método da posição relativa.

posição	Res. Int. $\sigma_0$ (MPa)	$\ln \sigma$	20 CPs	Probabilidade de Falha F(V)	$\ln \ln F(V)$	posição	Res. Int. $\sigma_0$ (MPa)	$\ln \sigma$	20 CPs	Probabilidade de Falha F(V)	$\ln \ln F(V)$	posição	Res. Int. $\sigma_0$ (MPa)	$\ln \sigma$	20 CPs	Probabilidade de Falha F(V)	$\ln \ln F(V)$
1	25,91	3,25	1/35	0,028	-3,569	1	30,57	3,42	1*/20	0,048	-3,020	1	25,91	3,25	1*/15	0,063	-2,740
2	27,49	3,31	2/35	0,056	-2,862	2	31,35	3,45	2*/20	0,095	-2,302	2	27,49	3,31	2*/15	0,125	-2,013
3	28,00	3,33	3/35	0,083	-2,442	3	31,36	3,45	3*/20	0,143	-1,870	3	28,00	3,33	3*/15	0,188	-1,572
4	28,01	3,33	4/35	0,111	-2,139	4	31,52	3,45	4*/20	0,190	-1,554	4	28,01	3,33	4*/15	0,250	-1,246
5	28,26	3,34	5/35	0,139	-1,900	5	31,67	3,46	5*/20	0,238	-1,302	5	28,26	3,34	5*/15	0,313	-0,982
6	28,52	3,35	6/35	0,167	-1,702	6	32,08	3,47	6*/20	0,286	-1,089	6	28,52	3,35	6*/15	0,375	-0,755
7	30,17	3,41	7/35	0,194	-1,531	7	32,13	3,47	7*/20	0,333	-0,903	7	30,17	3,41	7*/15	0,438	-0,553
8	30,30	3,41	8/35	0,222	-1,381	8	32,29	3,47	8*/20	0,381	-0,735	8	30,30	3,41	8*/15	0,500	-0,367
9	30,57	3,42	9/35	0,250	-1,246	9	32,38	3,48	9*/20	0,429	-0,581	9	30,90	3,43	9*/15	0,563	-0,190
10	30,90	3,43	10/35	0,278	-1,123	10	32,74	3,49	10*/20	0,476	-0,436	10	31,05	3,44	10*/15	0,625	-0,019
11	31,05	3,44	11/35	0,306	-1,009	11	32,82	3,49	11*/20	0,524	-0,298	11	31,62	3,45	11*/15	0,688	0,151
12	31,35	3,45	12/35	0,333	-0,903	12	33,09	3,50	12*/20	0,571	-0,166	12	31,78	3,46	12*/15	0,750	0,327
13	31,36	3,45	13/35	0,361	-0,803	13	33,45	3,51	13*/20	0,619	-0,036	13	32,06	3,47	13*/15	0,813	0,515
14	31,52	3,45	14/35	0,389	-0,708	14	33,49	3,51	14*/20	0,667	0,094	14	33,15	3,50	14*/15	0,875	0,732
15	31,62	3,45	15/35	0,417	-0,618	15	33,71	3,52	15*/20	0,714	0,225	15	34,42	3,54	15*/15	0,938	1,020
16	31,67	3,46	16/35	0,444	-0,531	16	33,79	3,52	16*/20	0,762	0,361	16					
17	31,78	3,46	17/35	0,472	-0,448	17	34,30	3,54	17*/20	0,810	0,506	17					
18	32,06	3,47	18/35	0,500	-0,367	18	36,24	3,59	18*/20	0,857	0,666	18					
19	32,08	3,47	19/35	0,528	-0,287	19	38,09	3,64	19*/20	0,905	0,855	19					
20	32,13	3,47	20/35	0,556	-0,210	20	38,37	3,65	20*/20	0,952	1,113	20					
21	32,29	3,47	21/35	0,583	-0,133	21						21					
22	32,38	3,48	22/35	0,611	-0,057	22						22					
23	32,74	3,49	23/35	0,639	0,018	23						23					
24	32,82	3,49	24/35	0,667	0,094	24						24					
25	33,09	3,50	25/35	0,694	0,170												
26	33,15	3,50	26/35	0,722	0,248												
27	33,45	3,51	27/35	0,750	0,327												
28	33,49	3,51	28/35	0,778	0,408												
29	33,71	3,52	29/35	0,806	0,493												
30	33,79	3,52	30/35	0,833	0,583												
31	34,30	3,54	31/35	0,861	0,680												
32	34,42	3,54	32/35	0,889	0,787												
33	36,24	3,59	33/35	0,917	0,910												
34	38,09	3,64	34/35	0,944	1,061												
35	38,37	3,65	35/35	0,972	1,276												

Grupo 43 2º ciclo M. Sintético	Res. Intrínseca (s0) (Mpa)	Mód. De Weibull	Mod. Elasticidade médio E (Gpa)	C.V.	Tensão Ruptura	C.V.
35 CPs 2º Ciclo Total	33,16	13,09	3,87	14,2%	31,92	8,3%
20 CPs 2º Ciclo S/ Desb.	34,36	15,52	3,57	7,3%	33,27	6,2%
15 CPs 2º Ciclo C/ Desb.	31,23	13,17	4,26	13,8%	30,11	7,6%



A Tabela (4.5), desenvolve esta metodologia para 35, 20 e 15CPs, tratando o grupo na totalidade e separadamente os CPs com Desbaste e CPs Sem Desbaste no Grupo 43.

#### 4.4.1 - Resultado dos Ensaios Quanto ao Incremento Gradual de Reciclados

Durante esta fase de ensaios foram utilizados dois tipos de suporte, Articulado (SA) e Fixo (SF), para o ensaio de Flexão de Três Pontos. Dentro de um mesmo grupo, ocorreram ensaios com os dois tipos de suporte. Os dados obtidos estão dispostos individualmente para cada suporte e em ambos no conjunto Total do Grupo em questão na Tabela (4.6).

Tabela 4. 6 - Comparação entre resultados totais, com suporte Fixo e Articulado.

Grupo / Composição	Qtd CP / Grupo		Res. Intrínseca ( $\sigma_0$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull	Mod. Elasticidade médio E (Gpa)	C.V.	Média Tensão de Rupt. ( $\sigma_m$ ) (Mpa)	C.V.	Índice m/CV
Grupo 26 (Rejeito 100%)	34 CPs	<b>Total</b>	<b>33,17</b>	<b>16,61</b>	<b>12,87</b>	<b>8,9%</b>	<b>32,27</b>	<b>6,0%</b>	<b>0,99</b>
	16 CPs	Sup. Fixo (SF)	32,59	13,31	12,60	9,1%	31,77	7,1%	0,95
	18 CPs	Sup. Art.(SA)	33,60	21,21	13,10	8,2%	32,72	4,4%	0,93
Grupo 27 (100% Sint.)	30 CPs	<b>Total (SA)</b>	<b>33,14</b>	<b>16,99</b>	<b>6,42</b>	<b>6,4%</b>	<b>32,17</b>	<b>6,2%</b>	<b>1,05</b>
Grupo 24 (90% Sint. + 10% Calc)	30 CPs	<b>Total</b>	<b>31,57</b>	<b>26,36</b>	<b>6,84</b>	<b>11,6%</b>	<b>30,95</b>	<b>4,1%</b>	<b>1,07</b>
	20 CPs	Sup. Fixo (SF)	31,32	24,19	6,72	10,6%	30,67	4,2%	1,02
	10 CPs	Sup. Art.(SA)	32,04	29,56	7,07	12,7%	31,51	3,1%	0,92
Grupo 23 (80% Sint.+ 20% Calc)	30 CPs	<b>Total (SA)</b>	<b>31,52</b>	<b>15,74</b>	<b>7,85</b>	<b>10,8%</b>	<b>30,52</b>	<b>6,8%</b>	<b>1,06</b>
Grupo 22 (70% Sint.+ 30% Calc)	35 CPs	<b>Total</b>	<b>31,54</b>	<b>28,94</b>	<b>8,31</b>	<b>6,4%</b>	<b>30,98</b>	<b>3,6%</b>	<b>1,05</b>
	20 CPs	Sup. Fixo (SF)	31,49	25,49	8,16	6,1%	30,86	3,7%	0,95
	15 CPs	Sup. Art.(SA)	31,67	28,92	8,57	5,4%	31,01	3,3%	0,96
Grupo 21 (60% Sint.+ 40% Calc)	34 CPs	<b>Total</b>	<b>31,57</b>	<b>22,90</b>	<b>9,13</b>	<b>9,6%</b>	<b>30,86</b>	<b>4,8%</b>	<b>1,10</b>
	19 CPs	Sup. Fixo (SF)	31,43	21,35	8,60	7,9%	30,69	4,8%	1,02
	15 CPs	Sup. Art.(SA)	31,80	21,19	9,81	6,0%	31,06	4,7%	0,99
Grupo 20 (50% Sint.+ 50% Calc)	35 CPs	<b>Total</b>	<b>31,26</b>	<b>16,80</b>	<b>10,12</b>	<b>6,9%</b>	<b>30,32</b>	<b>6,4%</b>	<b>1,08</b>
	18 CPs	Sup. Fixo (SF)	31,54	13,64	9,95	7,9%	30,43	7,1%	0,97
	17 CPs	Sup. Art.(SA)	31,04	18,22	10,30	5,2%	30,21	5,6%	1,01
Grupo 19 (40% Sint.+ 60% Calc)	30 CPs	<b>Total (SA)</b>	<b>31,36</b>	<b>20,21</b>	<b>10,85</b>	<b>6,9%</b>	<b>30,57</b>	<b>5,3%</b>	<b>1,06</b>
Grupo 18 (30% Sint.+ 70% Calc)	30 CPs	<b>Total (SA)</b>	<b>30,64</b>	<b>19,46</b>	<b>10,67</b>	<b>9,2%</b>	<b>29,12</b>	<b>4,9%</b>	<b>0,96</b>
Grupo 17 (20% Sint.+ 80% Calc)	31 CPs	<b>Total</b>	<b>30,20</b>	<b>17,67</b>	<b>11,06</b>	<b>12,9%</b>	<b>29,34</b>	<b>5,9%</b>	<b>1,04</b>
	20 CPs	Sup. Fixo (SF)	29,87	15,43	10,69	13,5%	29,13	6,1%	0,94
	11 CPs	Sup. Art.(SA)	30,73	22,48	12,13	5,4%	29,94	4,6%	1,03
Grupo 16 (10% Sint.+ 90% Calc)	35 CPs	<b>Total</b>	<b>29,23</b>	<b>19,46</b>	<b>12,19</b>	<b>15%</b>	<b>28,48</b>	<b>6%</b>	<b>1,08</b>
	20 CPs	Sup. Fixo (SF)	29,10	15,84	11,17	14%	28,20	6%	1,00
	15 CPs	Sup. Art.(SA)	29,45	24,01	13,55	8%	28,85	4%	0,99
Grupo 25 (Calcário 100%)	33 CPs	<b>Total</b>	<b>28,92</b>	<b>22,09</b>	<b>13,52</b>	<b>8,1%</b>	<b>28,25</b>	<b>4,9%</b>	<b>1,09</b>
	15 CPs	Sup. Fixo (SF)	27,97	23,31	12,88	7,2%	27,38	4,1%	0,96
	18 CPs	Sup. Art.(SA)	29,56	25,37	14,05	6,7%	28,97	4,0%	1,02

Nas Tabelas (4.6, 4.7, 4.8 e 4.9), estão dispostos os resultados da Resistência Intrínseca  $\sigma_0$  (MPa), módulo de Weibull  $m$ , Módulo de Elasticidade  $E$  (GPa) e Coeficiente de Variação (C.V.) do Módulo de Elasticidade (%), Média da Tensão de Ruptura e respectivo (C.V.) e ainda o índice ( $m \times C.V.$ ), que conforme Hull e Clyne (2005) é aproximadamente constante ao se ensaiar compósitos com filamentos de fibras.

Dentro de um mesmo grupo, que teve ensaios com os dois tipos de suportes: Articulado (SA); e Fixo (SF), foram realizadas análises de formas individual e em conjunto, a fim de avaliar o desempenho do tipo de suporte utilizado pelo mesmo grupo, e ainda avaliar a modelagem matemática adotada em estudo comparativo. Na Tabela (4.7) os tipos de Suporte empregados nos ensaios: Articulado (AS); e Fixo (SF), estão discriminados e identificados em cada caso. A Tabela (4.8) refere-se unicamente a resultados de ensaios com Suporte Articulado (SA), mas os diferencia entre os SA Parciais e Totais.

Tabela 4. 7 - Resultados totais de cada Grupo

Grupo / Composição	Qtd CP / Tipo de Suporte		Res. Intrínseca ( $\sigma_0$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull	Mod.Elastici de médio E (Gpa)	C.V.	Média Tensão de Rupt. ( $\sigma_m$ ) (Mpa)	C.V.	Índice m/CV
26- Rejeito 100%	34 CPs	Total (SA) + (SF)	33,17	16,61	12,87	8,9%	32,27	6,0%	0,99
27-Sintetico 100%	30 CPs	Total (SA)	33,14	16,99	6,42	6,4%	32,17	6,2%	1,05
24 - 10% Calc. + 90% Sint.	30 CPs	Total (SA) + (SF)	31,57	26,36	6,84	11,6%	30,95	4,1%	1,07
23 - 20% Calc. + 80% Sint.	30 CPs	Total (SA)	31,52	15,74	7,85	10,8%	30,52	6,8%	1,06
22 - 30% Calc. + 70% Sint.	35 CPs	Total (SA) + (SF)	31,54	28,94	8,31	6,4%	30,98	3,6%	1,05
21 - 40% Calc. + 60% Sint.	34 CPs	Total (SA) + (SF)	31,57	22,90	9,13	9,6%	30,86	4,8%	1,10
20 - 50% Calc. + 50% Sint.	35 CPs	Total (SA) + (SF)	31,26	16,80	10,12	6,9%	30,32	6,4%	1,08
19 - 60% Calc. + 40% Sint.	30 CPs	Total (SA)	31,36	20,21	10,85	6,9%	30,57	5,3%	1,06
18 - 70% Calc. + 30% Sint.	30 CPs	Total (SA)	30,64	19,46	10,67	9,2%	29,12	4,9%	0,96
17 - 80% Calc. + 20% Sint.	31 CPs	Total (SA) + (SF)	30,20	17,67	11,06	12,9%	29,34	5,9%	1,04
16 - 90% Calc. + 10% Sint.	35 CPs	Total (SA) + (SF)	29,23	19,46	12,19	15%	28,48	6%	1,08
25- Calcario 100%	33 CPs	Total (SA) + (SF)	28,92	22,09	13,52	8,1%	28,25	4,9%	1,09

A partir da Tabela (4.7) obteve os seguintes gráficos:

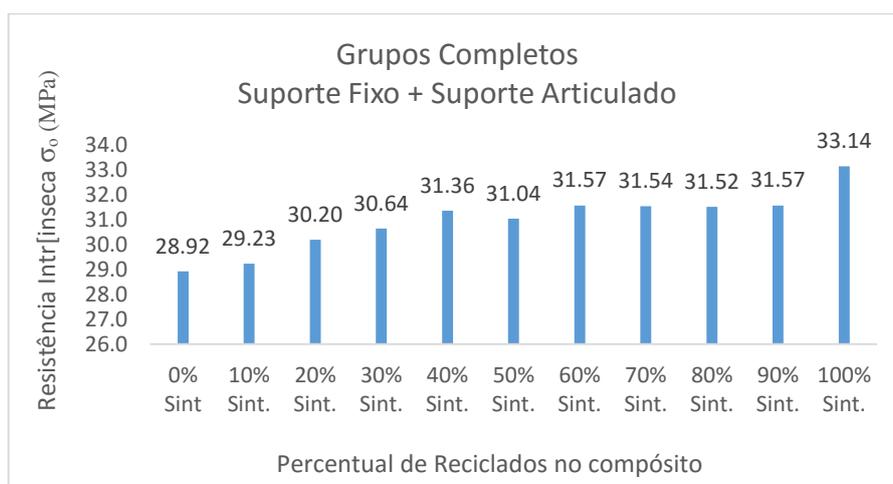


Figura 4. 10 - Gráfico da Resistência Intrínseca ( $\sigma_0$ ) x % de Reciclados na composição

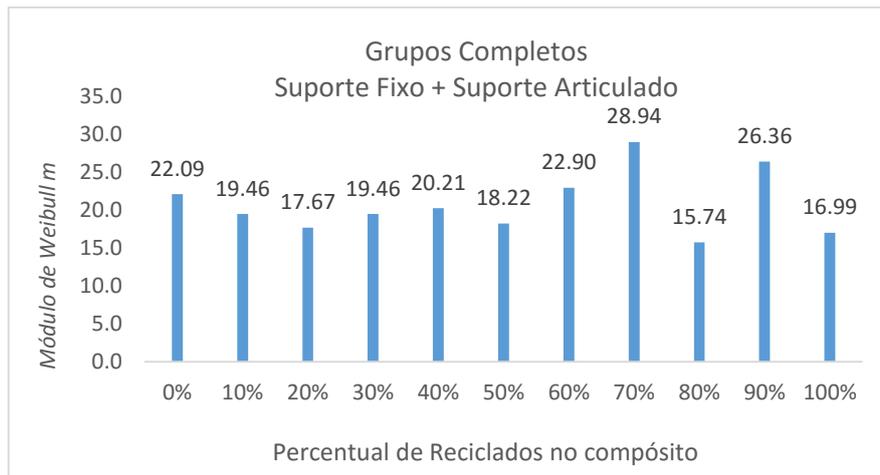


Figura 4. 11 - Variação do Módulo Weibull  $m$  na medida em que se aumenta o índice de reciclados.

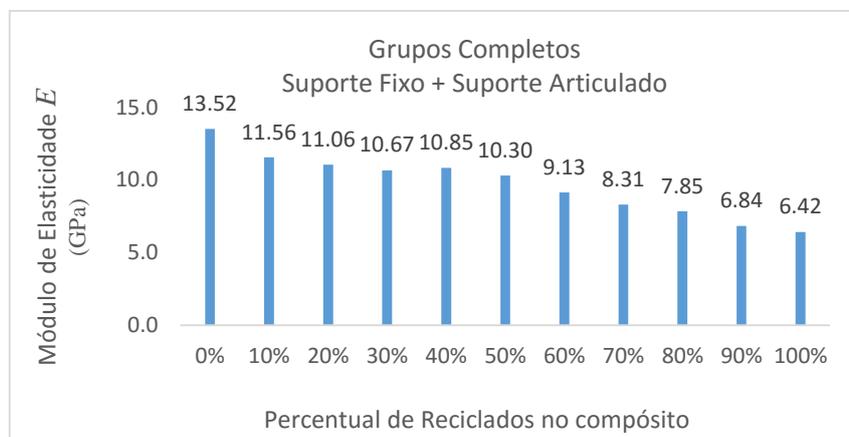


Figura 4. 12 - Gráfico do Módulo de elasticidade ( $E$ ) x % de Reciclados na composição

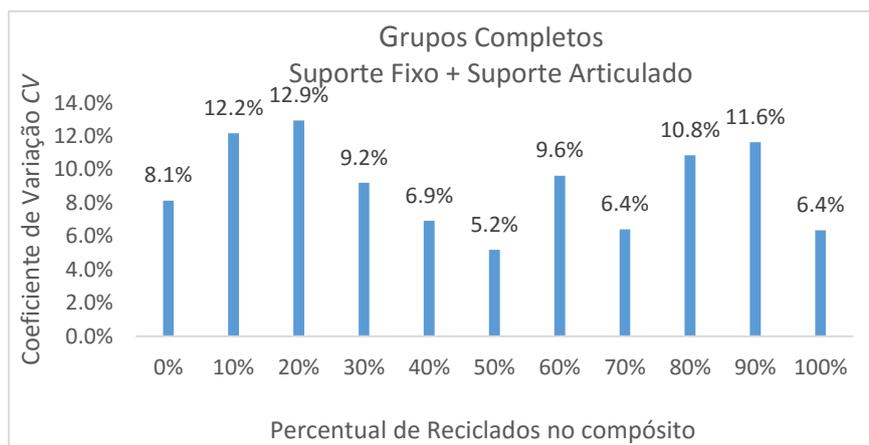


Figura 4. 13 - Comportamento do Coeficiente de Variação CV em relação ao Módulo de elasticidade  $E$  quanto a inserção gradual de Reciclados.

Levando-se em consideração somente os Grupos que foram avaliados pelo Suporte Articulado (SA), obteve-se a Tabela (4.8).

Tabela 4. 8 - Resultados dos grupos de ensaios com SA, Parciais e Totais

Grupo / Composição	Qtd CP / Grupo		Res. Intrínseca ( $\sigma_0$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull	Mod.Elastici de médio E (Gpa)	C.V.	Média Tensão de Rupt. ( $\sigma_m$ ) (Mpa)	C.V.	Índice m/CV
26- Rejeito 100%	34 CPs	Total (SA) + (SF)	33,17	16,61	12,79	9,7%	32,27	6,0%	0,99
27-Sintetico 100%	30 CPs	Total (SA)	33,14	16,99	6,42	6,4%	32,17	6,2%	1,05
24 - 10% Calc. + 90% Sint.	30 CPs	Total (SA) + (SF)	31,57	26,36	6,74	10,2%	30,95	4,1%	1,07
23 - 20% Calc. + 80% Sint.	30 CPs	Total (SA)	31,52	15,74	7,85	10,8%	30,52	6,8%	1,06
22 - 30% Calc. + 70% Sint.	35 CPs	Total (SA) + (SF)	31,54	28,94	8,31	6,4%	30,98	3,6%	1,05
21 - 40% Calc. + 60% Sint.	34 CPs	Total (SA) + (SF)	31,57	22,90	9,13	9,6%	30,86	4,8%	1,10
20 - 50% Calc. + 50% Sint.	35 CPs	Total (SA) + (SF)	31,26	16,80	10,12	6,9%	30,32	6,4%	1,08
19 - 60% Calc. + 40% Sint.	30 CPs	Total (SA)	31,36	20,21	10,85	6,9%	30,57	5,3%	1,06
18 - 70% Calc. + 30% Sint.	30 CPs	Total (SA)	30,64	19,46	10,54	8,0%	29,12	4,9%	0,96
17 - 80% Calc. + 20% Sint.	31 CPs	Total (SA) + (SF)	30,20	17,67	11,06	12,9%	29,34	5,9%	1,04
16 - 90% Calc. + 10% Sint.	35 CPs	Total (SA) + (SF)	29,23	19,46	12,19	15%	28,48	6%	1,08
25- Calcario 100%	33 CPs	Total (SA) + (SF)	28,92	22,09	13,52	8,1%	28,25	4,9%	1,09

A partir destes resultados foram obtidos os gráficos das Figuras (4.14, 4.15, 4.16 e 4.17).

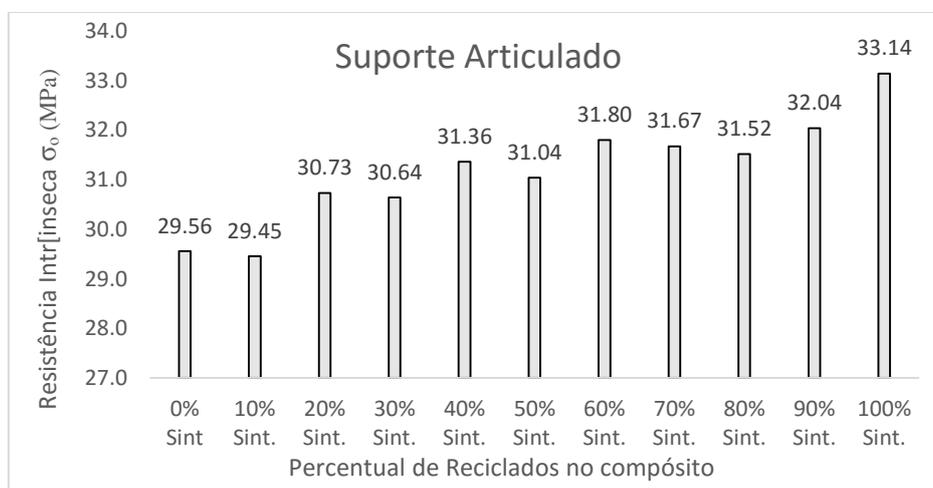


Figura 4. 14 - Gráfico da Resistência Intrínseca ( $\sigma_0$ ) x % de Reciclados na composição, somente com Grupos ensaiados com SA.

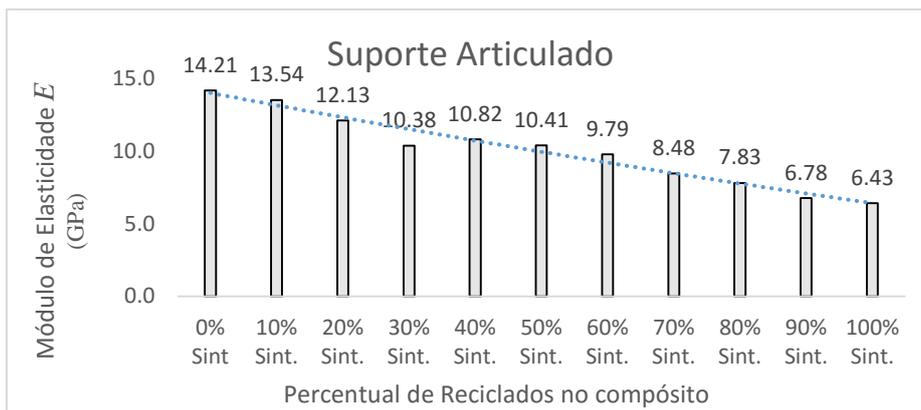


Figura 4. 16 - Variação do Módulo Weibull  $m$  na medida em que se aumenta o índice de reciclados, somente com Grupos ensaiados com SA.

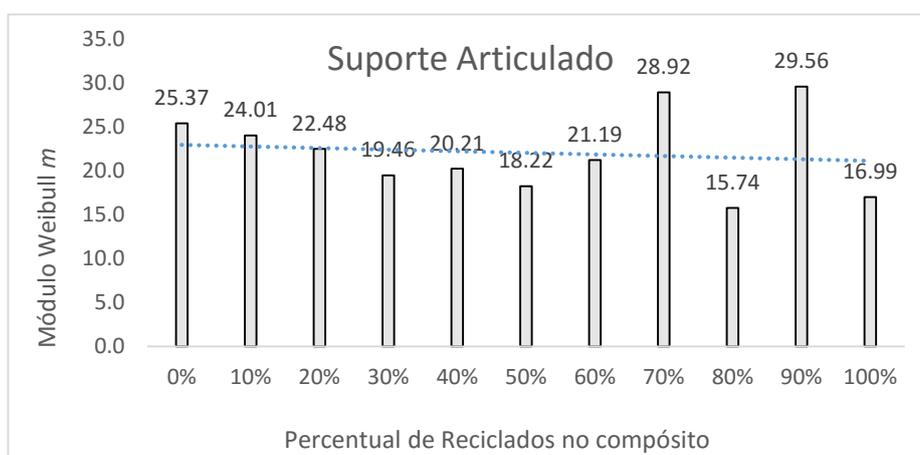


Figura 4. 15 - Gráfico do Módulo de elasticidade ( $E$ ) x % de Reciclados na composição, somente com Grupos ensaiados com SA.

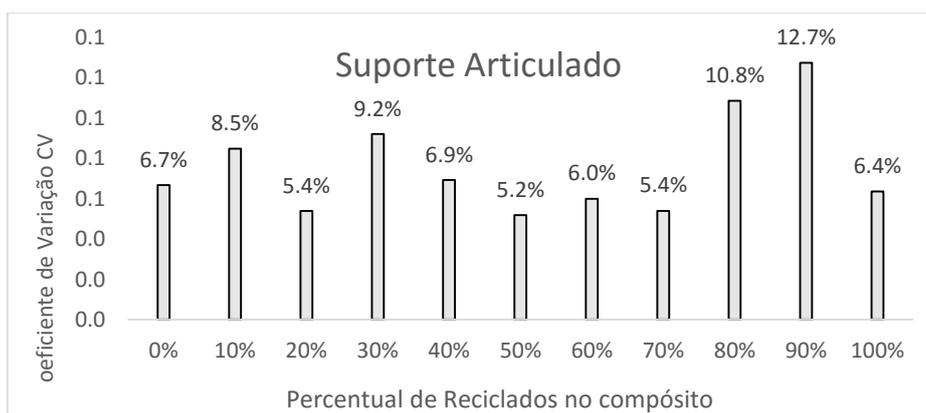


Figura 4. 17 - Comportamento do Coeficiente de Variação CV em relação ao Módulo de elasticidade  $E$  quanto a inserção gradual de Reciclados em ensaios com SA.

Da mesma Forma agrupa-se os resultados somente dos ensaios realizados pelo Suporte Fixo (SF), obtendo a Tabela (4.9).

Tabela 4. 9 - Resultados obtidos somente com ensaios através do SF.

Grupo / Composição	Qtd CP / Grupo	Res. Intrínseca (s0) (Mpa)	Mód. De Weibull	Mod. Elasticidade médio E (Gpa)	C.V.	Média Tensão de Rupt. (sm) (Mpa)	C.V.	Índice
<b>26- Rejeito 100%</b>	16 CPs Sup. Fixo (SF)	32,59	13,31	12,60	9,1%	31,77	7,1%	0,95
<b>27-Sintético 100%</b>	Não houve ensaios com Suporte Fixo							
24 - 10%Calc. + 90%Sint.	20 CPs Sup. Fixo (SF)	31,32	24,19	6,72	10,6%	30,67	4,2%	1,02
23 - 20%Calc. + 80%Sint.	Não houve ensaios com Suporte Fixo							
22 - 30%Calc. + 70%Sint.	20 CPs Sup. Fixo (SF)	31,49	25,49	8,16	6,1%	30,86	3,7%	0,95
21 - 40%Calc. + 60%Sint.	19 CPs Sup. Fixo (SF)	31,43	21,35	8,60	7,9%	30,69	4,8%	1,02
20 - 50%Calc. + 50%Sint.	18 CPs Sup. Fixo (SF)	31,54	13,64	9,95	7,9%	30,43	7,1%	0,97
19 - 60%Calc. + 40%Sint.	Não houve ensaios com Suporte Fixo							
18 - 70%Calc. + 30%Sint.	Não houve ensaios com Suporte Fixo							
17 - 80%Calc. + 20%Sint.	20 CPs Sup. Fixo (SF)	29,87	15,43	10,69	13,5%	29,13	6,1%	0,94
16 - 90%Calc. + 10%Sint.	20 CPs Sup. Fixo (SF)	29,10	15,84	11,17	14%	28,20	6,3%	1,00
<b>25- Calcario 100%</b>	15 CPs Sup. Fixo (SF)	27,97	23,31	12,88	7,2%	27,38	4,1%	0,96

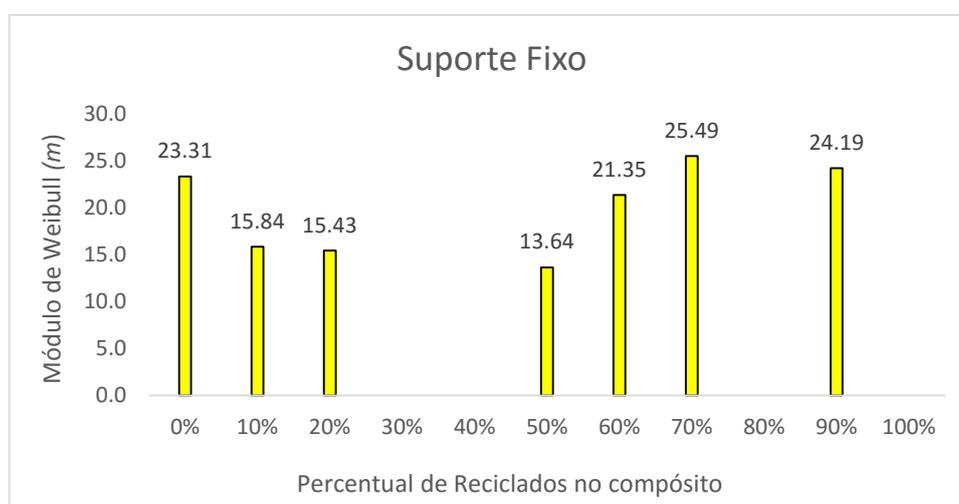


Figura 4. 18 - Variação do Módulo Weibull  $m$ , na medida em que se aumenta o índice de reciclados, somente com Grupos ensaiados com SF.

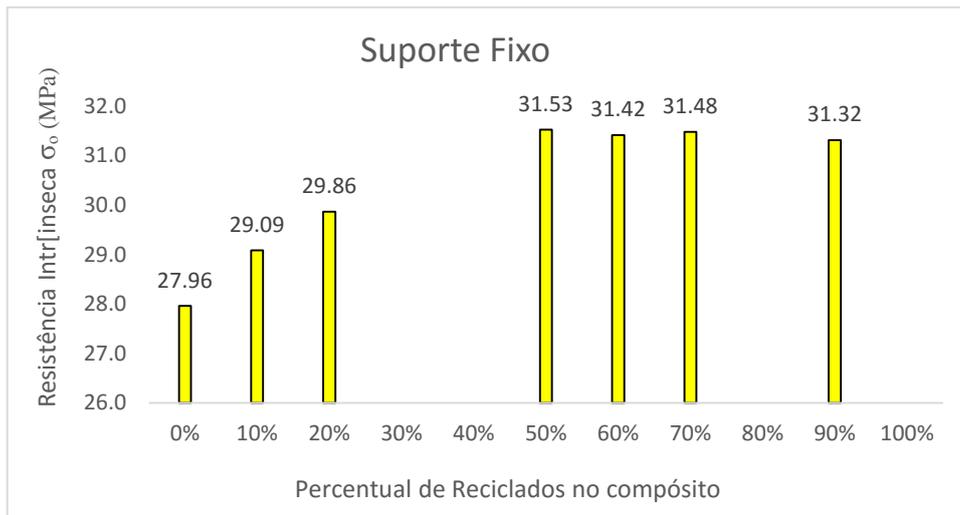


Figura 4. 19 - Comportamento da Resistência Intrínseca  $\sigma_0$  com a variação de matéria prima reciclada.

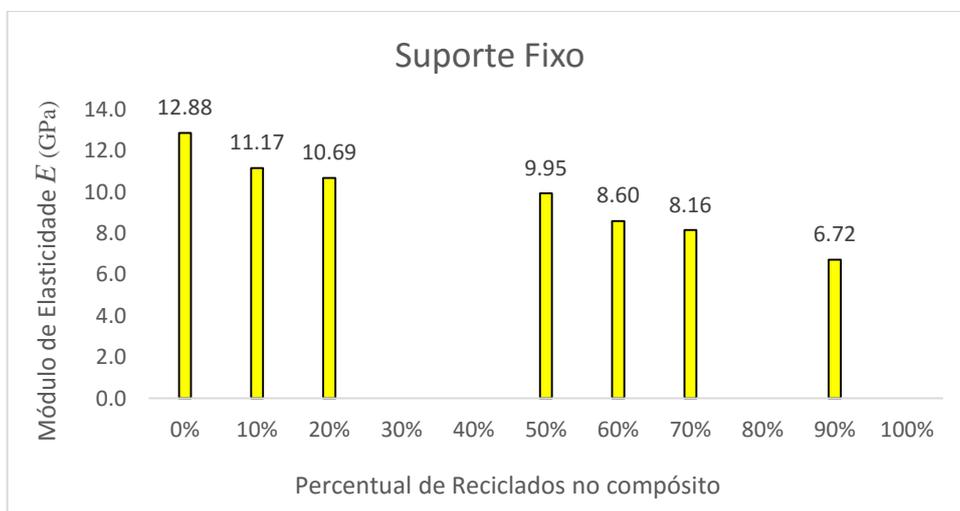


Figura 4. 20 - Gráfico do Módulo de elasticidade ( $E$ ) x % de Reciclados na composição, somente com Grupos ensaiados com SF.

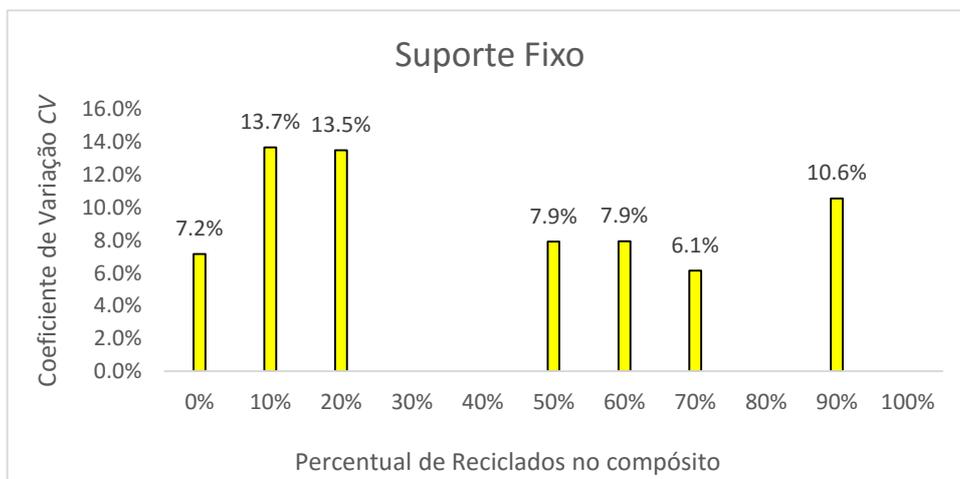


Figura 4. 21 - Comportamento do Coeficiente de Variação  $CV$  em relação ao Módulo de elasticidade  $E$  quanto a inserção gradual de Reciclados em ensaios com SF.

#### 4.4.2 - Resultados dos Ensaios Quanto ao Número de Ciclos de Reciclagem

Durante os ensaios dos CPs de ciclos múltiplos, executados somente com o Suporte Articulado, foi possível inserir uma nova variação nos ensaios deste estudo, que é o acabamento na parte inferior do CP, com o intuito de minimizar as irregularidades, decorrentes do processo de fabricação e obter seções transversais retangulares e prismáticas. Foram retirados de Três Grupos, 42, 43 e 44. Os CPs que apresentavam irregularidades significativas, em torno de 1,0 mm de diferença ao longo do CP, e procedeu-se o acabamento superficial, em 10 CPs no Grupo 44, 11 CPs no Grupo 42 e 15 CPs no Grupo 43. Durante esta fase de ensaios foi utilizado somente o Suporte Articulado (SA), porém com duas varrições para os grupos já citados: com Desbaste e sem Desbaste. Os dados obtidos estão dispostos individualmente para cada tipo de acabamento, e em ambos no conjunto Total do Grupo em questão. Nas Tabelas (4.9, 4.10, 4.11 e 4.12), estão dispostos o resultados da Resistência Intrínseca  $\sigma_0$  (Mpa), módulo de Weibull  $m$ , Módulo de Elasticidade  $E$  (GPa) e Coeficiente de Variação (C.V.) do Módulo de Elasticidade (%), Média da Tensão de Ruptura e respectivo (C.V.) e ainda o índice ( $m \times C.V.$ ).

Tabela 4. 10 - Comparação entre resultados totais e parciais dos grupos com e sem Desbaste.

Grupos Totais e Parciais (Sem e Com Desbaste)		Res. Intrínseca (s0) (Mpa)	Mód. De Weibull	Mod.Elasticidade médio E (Gpa)	C.V.	Tensão Ruptura (Mpa)	C.V.	Índice
35 CPs	Gr.44 - 4º Ciclo Total	40,46	13,22	1,61	9,8%	38,96	7,9%	1,05
23 CPs	Gr.44 - 4º Ciclo S/ Desb.	41,29	19,66	1,67	8,0%	40,08	5,4%	1,06
10 CPs	Gr.44 - 4º Ciclo C/ Desb.	37,60	10,70	1,47	7,9%	36,01	8,1%	0,86
32 CPs	Gr.42 - 3º Ciclo Total	37,52	9,23	2,32	9,2%	35,61	11,1%	1,02
21 CPs	Gr.42 - 3º Ciclo S/ Desb.	38,65	16,56	2,29	7,9%	37,40	6,7%	1,11
11 CPs	Gr.43 - 3º Ciclo C/ Desb.	34,22	7,36	2,36	10,8%	32,21	12,2%	0,90
35 CPs	Gr.43 - 2º Ciclo Total	33,16	13,09	3,87	14,2%	31,92	8,3%	1,09
20 CPs	Gr.43 - 2º Ciclo S/ Desb.	34,36	15,52	3,57	7,3%	33,27	6,2%	0,96
15 CPs	Gr.43 - 2º Ciclo C/ Desb.	31,23	13,17	4,26	13,8%	30,11	7,6%	0,99
35 CPs	Gr.39 1ºciclo	32,64	17,56	5,39	11,2%	31,71	6,3%	1,11
30 CPs	Grupo 41 Calcário	31,11	22,26	11,37	9,6%	30,40	4,9%	1,10
12 CPs	Grupo ARA (Resina)	89,80	11,05	3,15	13,8%	85,81	9,1%	1,01
32 CPs	Grupo 32 Rejeito 2º ciclo	36,48	20,42	6,54	13,6%	35,57	5,2%	1,06
18 CPs	Grupo 26 Rejeito 1º ciclo	33,60	21,21	13,10	8,2%	32,72	4,4%	0,93

Analogamente, como foi realizado anteriormente na Tabela (4.7) de resultados, extraiu-se as tabelas com condições de similaridade para fins comparativos entre os Grupos. Assim, a Tabela 4.11 terá a somatória de todos os processos, já a Tabela 4.12 somente os grupos sem desbaste e finalmente a 4.13 somente os resultados dos CPs desbastados.

Tabela 4. 11 - Resultado geral dos grupos incluindo CPs sem e com desgaste.

Grupos Totais (Sem e Com Desbaste)		Res. Intrínseca ( $\sigma_0$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull	Mod.Elasticidade médio E (Gpa)	C.V.	Tensão Ruptura (Mpa)	C.V.	Índice
30 CPs	Gr.41 Calcário	31,11	22,26	11,37	9,6%	30,40	4,9%	1,10
35 CPs	Gr.39 1ºciclo	32,64	17,56	5,39	11,2%	31,71	6,3%	1,11
35 CPs	Gr.43 2ºciclo	33,16	13,09	3,87	14,2%	31,92	8,3%	1,09
32 CPs	Gr.42 3ºciclo	37,52	9,23	2,32	9,2%	35,61	11,1%	1,02
35 CPs	Gr.44 4ºciclo	40,46	13,22	1,61	9,8%	38,96	7,9%	1,05
12 CPs	Grupo ARA (Resina)	89,80	11,05	3,15	13,8%	85,81	9,1%	1,01

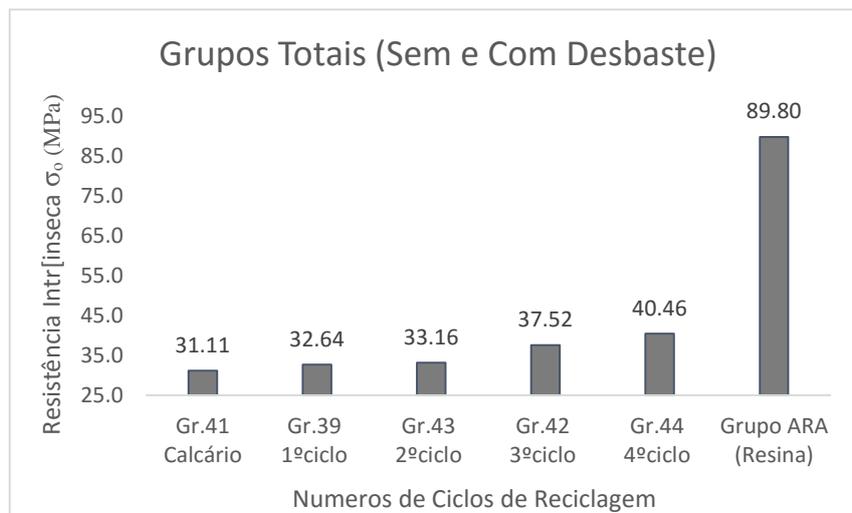


Figura 4. 22 - Avaliação da Resistência Intrínseca  $\sigma_0$  na medida que se avança o número de ciclos de reciclagens.

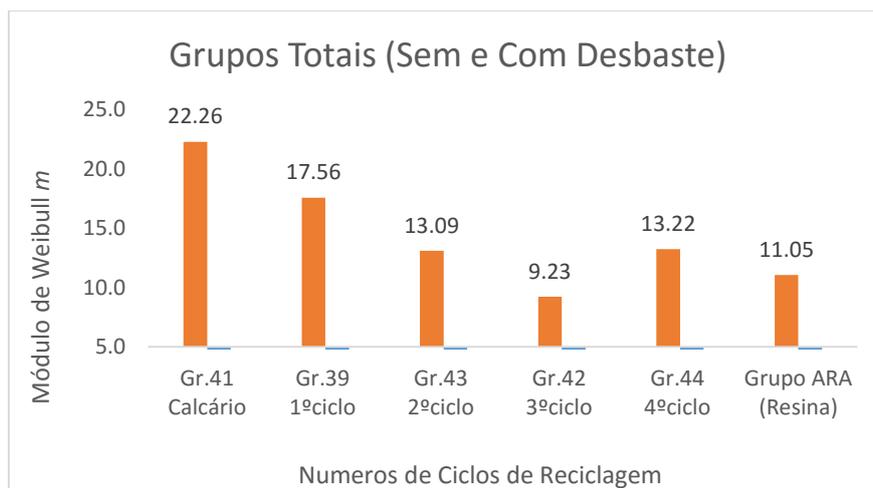


Figura 4. 23 - Variação do Módulo Weibull  $m$ , na medida em que se aumenta o número de ciclos.

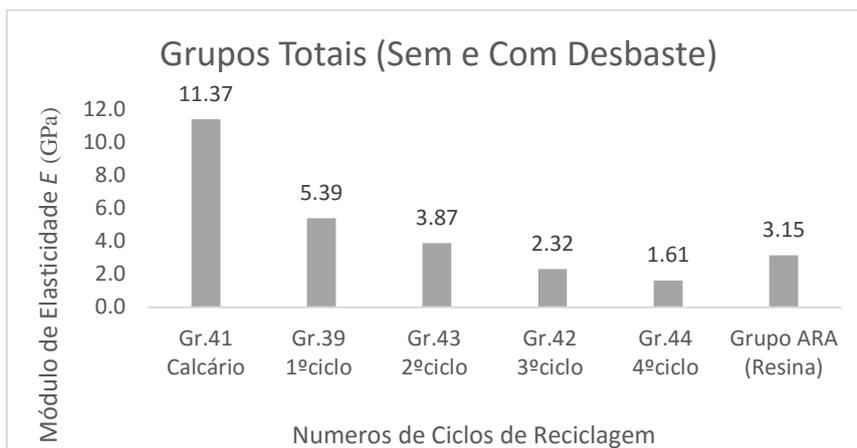


Figura 4. 24 - Gráfico do Módulo de elasticidade ( $E$ ) x Números de ciclos Avaliando o Grupo na totalidade.

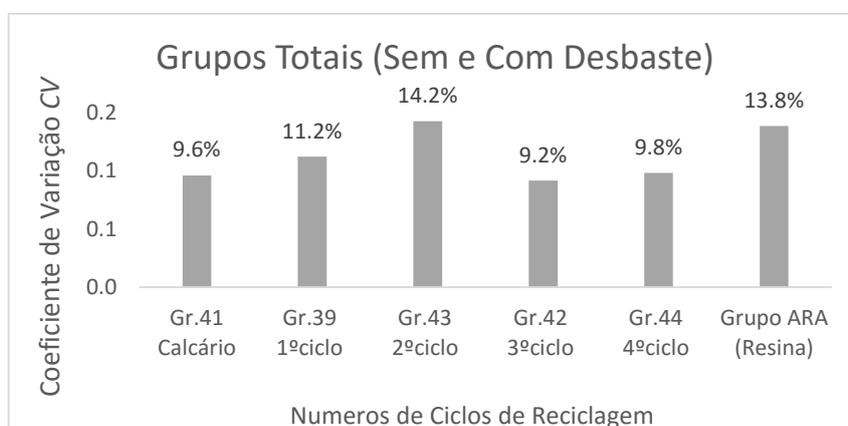


Figura 4. 25 - Comportamento do Coeficiente de Variação  $CV$  em relação ao Módulo de elasticidade  $E$  quanto ao número de ciclos.

Os dados dos CPs que foram ensaiados sem desbaste são apresentados na Tabela 4.12, que leva em consideração grupos totais e parciais e os respectivos números de CPs analisados.

Tabela 4. 12 - Tabela de Grupos Totais e Parciais, dos Grupos 39 ao 44, e Grupo ara, todos sem Desbaste na face inferior do CP.

Grupos Parciais e Totais (Sem Desbaste)	Res. Intrinseca (s0) (Mpa)	Mód. De Weibull	Mod.Elasticidade médio E (Gpa)	C.V.	Tensão Ruptura (Mpa)	C.V.	Indice
30 CPs Grupo 41 Calcário	31,11	22,26	11,37	9,6%	30,40	4,9%	1,10
35 CPs Gr.39 1ºciclo	32,64	17,56	5,39	11,2%	31,71	6,3%	1,11
20 CPs 2º Ciclo S/ Desb.	34,36	15,52	3,57	7,3%	33,27	6,2%	0,96
21 CPs 3º Ciclo S/ Desb.	38,65	16,56	2,29	7,9%	37,40	6,7%	1,11
23 CPs 4º Ciclo S/ Desb.	41,29	19,66	1,67	8,0%	40,08	5,4%	1,06
12 CPs Grupo ARA (Resina)	89,80	11,05	3,15	13,8%	85,81	9,1%	1,01

Os Gráficos que se seguem, são CPs livres de acabamentos e se tratam de Grupos totais e parciais criados a partir da Tabela (4.12) .

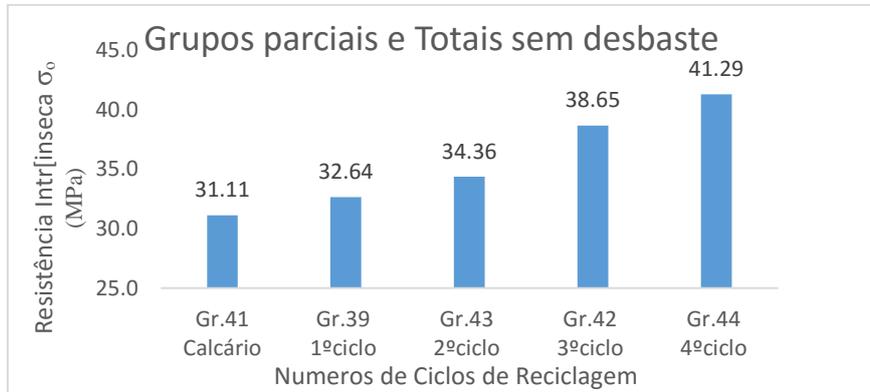


Figura 4. 26 - Comportamento da Resistência Intrínseca,  $\sigma_0$  , na medida que se avança o número de ciclos de reciclagens em CPs sem desgastes.

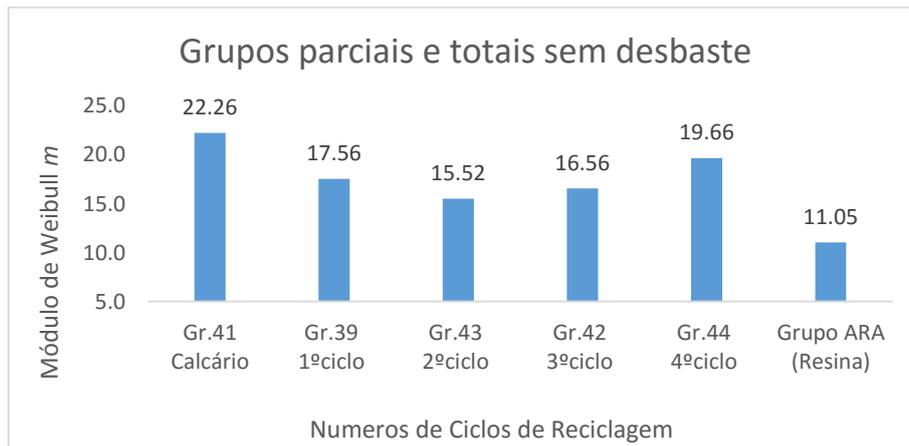


Figura 4. 27 - Resistência Intrínseca,  $\sigma_0$  , na medida que se avança o número de ciclos de reciclagens.

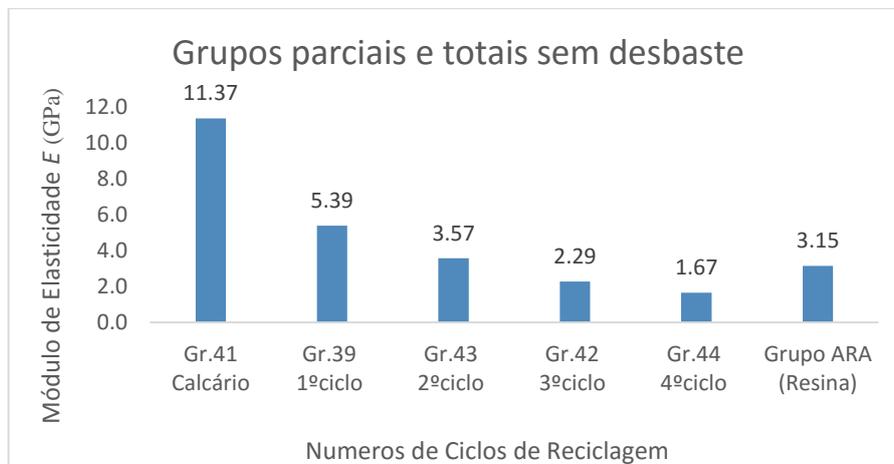


Figura 4. 28 - Gráfico do Módulo de elasticidade ( $E$ ) x Números de ciclos Avaliando os Grupos parciais com desgastes

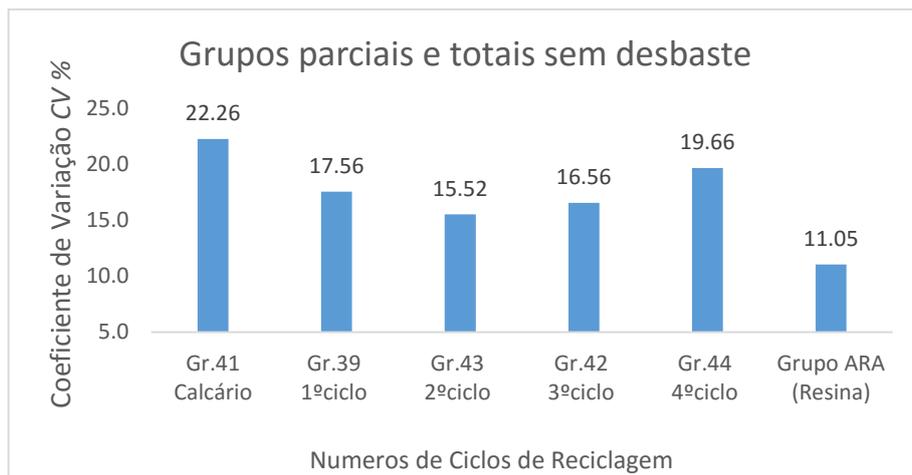


Figura 4. 29 - Comportamento do Coeficiente de Variação  $CV$  em relação ao Módulo de elasticidade  $E$  quanto ao número de ciclos.

O acabamento na parte inferior dos CPs (desbaste) foi executado somente em três grupos consecutivos de reciclagem, os resultados são apresentados pela Tabela (4.13).

Tabela 4. 13 - Tabela com resultados dos ensaios dos CPs que sofreram acabamento superficial, na superfície inferior.

Grupos Parciais (Com Desbaste)		Res. Intrínseca ( $\sigma_0$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull	Mod. Elasticidade médio $E$ (Gpa)	C.V.	Tensão Ruptura (Mpa)	C.V.	Índice
15 CPs	2º Ciclo C/ Desb.	31,23	13,17	4,26	13,8%	30,11	7,6%	0,99
11 CPs	3º Ciclo C/ Desb.	34,22	7,36	2,36	10,8%	32,21	12,2%	0,90
10 CPs	4º Ciclo C/ Desb.	37,60	10,70	1,47	7,9%	36,01	8,1%	0,86

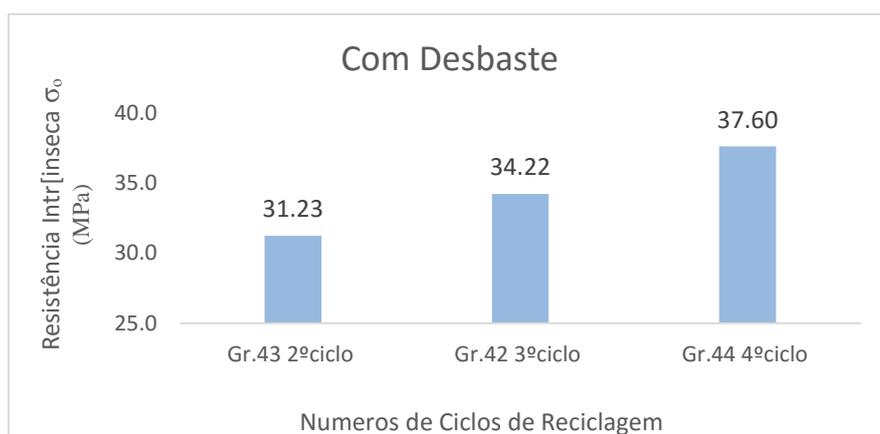


Figura 4. 30 - Comportamento da Resistência Intrínseca  $\sigma_0$ , em Ciclos Consecutivos de reciclagem em material com acabamento superficial inferior

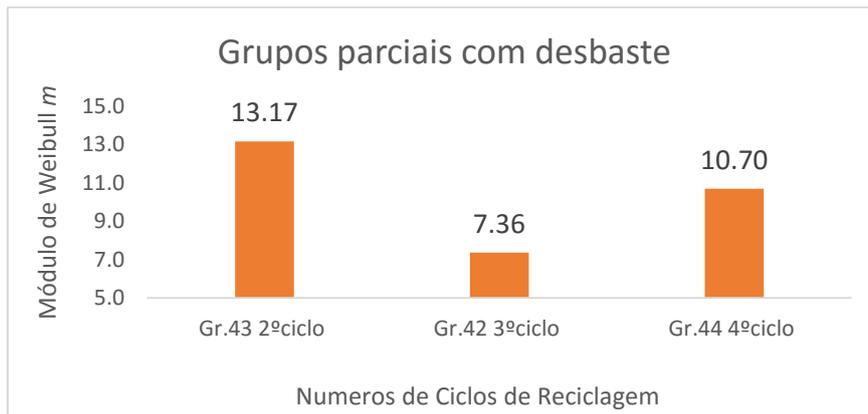


Figura 4. 31 - Variação do Modulo de Weibull no 2º, 3º e 4º ciclos de reciclagens em ensaios com CPs Desbastados.

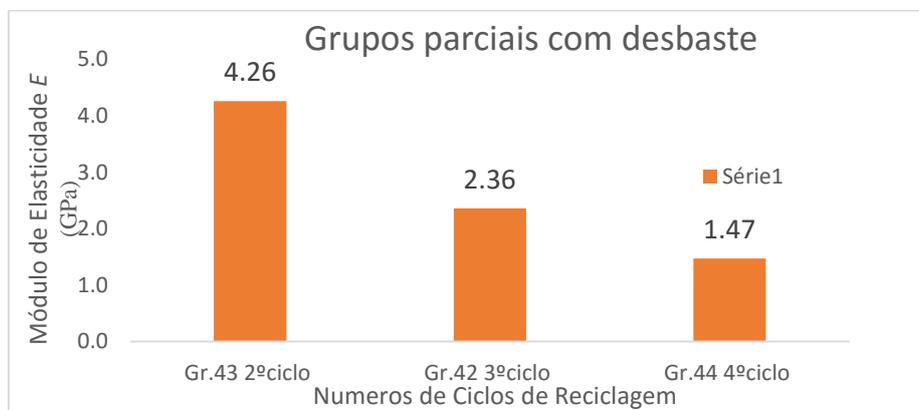


Figura 4. 32 - Gráfico do Módulo de elasticidade ( $E$ ) x Números de ciclos Avaliando os Grupos parciais com desbastes

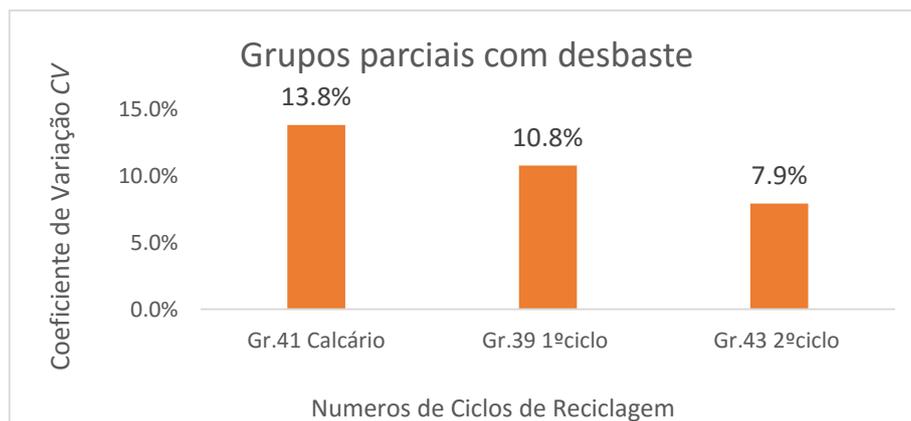


Figura 4. 33 - Comportamento do Coeficiente de Variação  $CV$  em relação ao Módulo de elasticidade  $E$  quanto ao número de ciclos, para CPs desbastados.

A Tabela (4.14), referente aos de ciclos de reciclagens, traz os resultados relativos à reciclagem de Rejeitos de marmorarias. Estes foram realizados ainda com o percentual de 20% de resina poliéster em sua composição, nos Grupos 26 de 1º ciclo e 32 de 2º ciclo,

e, para efeitos comparativos, traz também o Grupo 25 Calcário 100%, bem como o da Resina poliéster pura.

Tabela 4. 14 - Comportamento dos rejeitos de marmorarias quanto a ciclos consecutivos de reciclagem

Grupos de Calcario e Rejeito e Resina		Res. Intrínseca ( $\sigma_0$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull	Mod.Elasticidade médio E (Gpa)	C.V.	Tensão Ruptura (Mpa)	C.V.	Indice
18 CPs	Grupo 25 Calcario 100%	29,56	25,37	14,05	6,7%	28,97	4,0%	1,02
30 CPs	Grupo 27 Sintético 1º ciclo	33,14	16,99	6,42	6,4%	32,17	6,2%	1,05
18 CPs	Grupo 26 Rejeito 1º ciclo	33,60	21,21	13,10	8,2%	32,72	4,4%	0,93
32 CPs	Grupo 32 Rejeito 2º ciclo	36,48	20,42	6,54	13,6%	35,57	5,2%	1,06

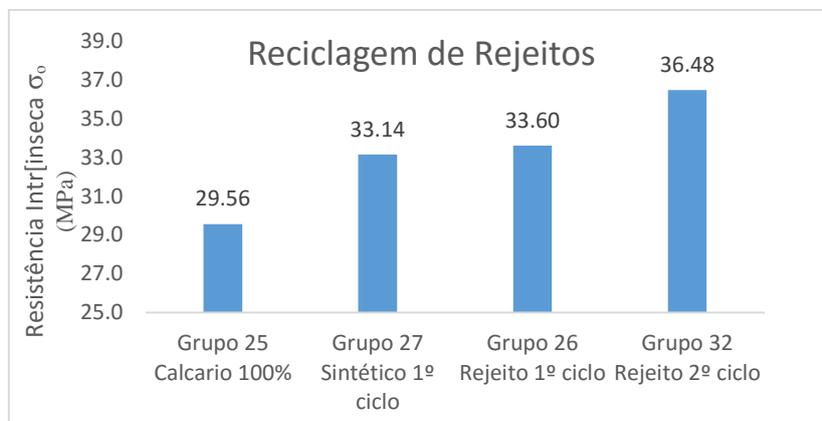


Figura 4. 34 - Gráfico da Resistência Intrínseca  $\sigma_0$ , em relação à reciclagem de Rejeitos de rochas e sintéticos.

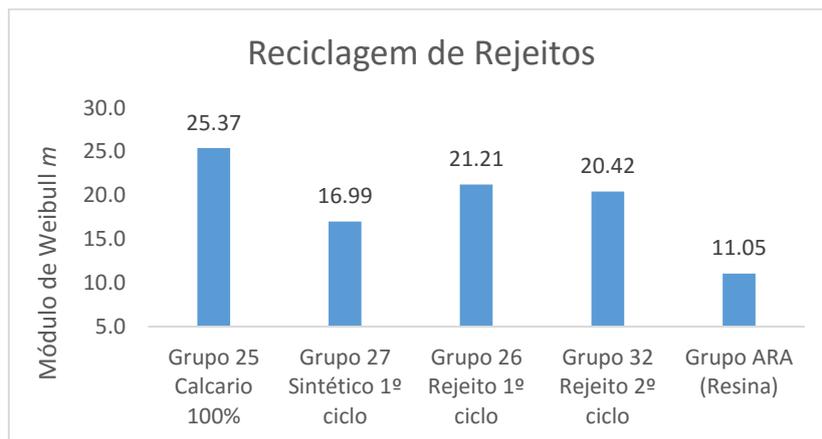


Figura 4. 35 - Variação do Módulo de Weibull  $m$ , em relação à reciclagem de Rejeitos de marmorarias em 1º e 2º ciclos e utilização de calcário puro, (sem reciclados).

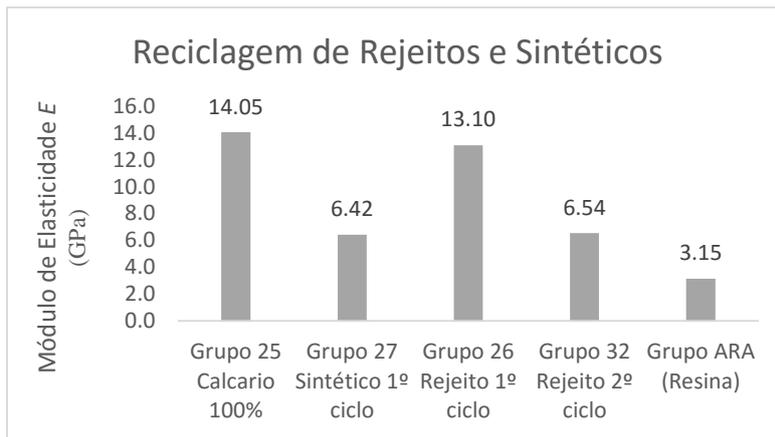


Figura 4. 36 - Variação do Módulo de Elasticidade  $E$ , em relação à reciclagem de Rejeitos de marmorarias em 1º e 2º ciclos e utilização de calcário puro, (sem reciclados).

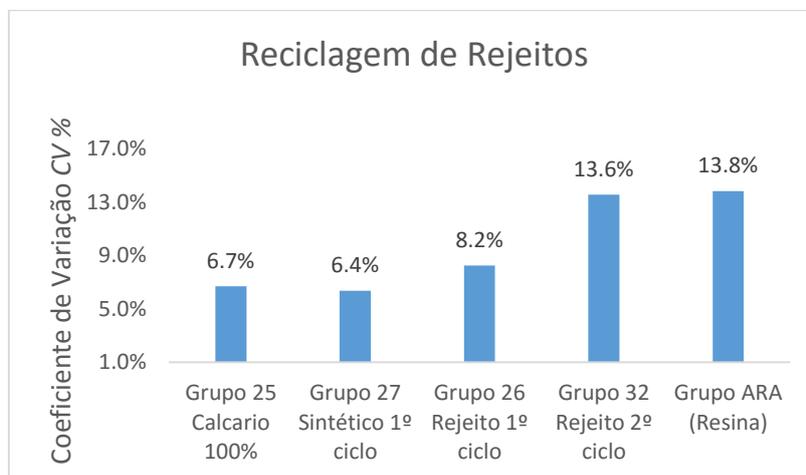


Figura 4. 37 - comportamento do coeficiente de variação CV em relação à reciclagem de Rejeitos de marmorarias em 1º e 2º ciclos e utilização de calcário puro, (sem reciclados).

## 4.5 - RESULTADOS ANALÍTICOS E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.

### 4.5.1 - Resultados Analíticos

Analiticamente pode-se, de forma aproximada, avaliar um dos importantes parâmetros para o cálculo da tensão de ruptura, o momento de inércia. O mesmo pode ser calculado utilizando as das equações (3.16) e (3.17), respectivamente, através da espessura média total da seção de ruptura, ou, ainda, através do momento de inércia combinado de um retângulo e um triângulo, simulando a seção semelhante a um trapézio. Ambas possibilidades são expostas na Tabela (4.17), tendo como exemplo os dados do grupo 8.

Através da metodologia analítica com aproximação da geometria que mais se aproxima do formato real do CPs, pôde-se encontrar os resultados, já apresentados até este item (4.4.1), utilizando as equações (2.2 e 2.4), para obtenção do Módulo de Elasticidade ( $E$ ), a Tensão de Ruptura média ( $\sigma$ ) e seus respectivos Coeficientes de Variação ( $C.V.$ ), serão então também calculados por simulação Numérica e comparados.

Tabela 4. 15 - Exemplo de variação de espessuras na seção de ruptura do Grupo 8.

	Ponto1 (mm)	Ponto3 (mm)	Média 1 e 3	Ponto2 (mm)	Ponto4 (mm)	Média 2 e 4	Diferença de espessura na seção de ruptura		Media Total	Largu ra b (mm)	Momento de Inércia espessura média (mm <sup>4</sup> )	Momento de Inércia CG médio (mm <sup>4</sup> )	Diferença %
							(mm)	%					
A1	8,02	8,02	8,02	8,06	8,06	8,06	0,04	0,50%	8,04	39,22	1 698,63	1 698,61	0,00%
B1	7,78	7,78	7,78	8,16	8,16	8,16	0,38	4,66%	7,97	39,44	1 665,80	1 663,91	0,11%
C1	7,56	7,60	7,58	8,02	8,06	8,04	0,46	5,72%	7,81	39,24	1 560,46	1 557,76	0,17%
D1	7,58	7,68	7,63	7,54	7,66	7,60	-0,03	-0,39%	7,62	39,30	1 446,19	1 446,18	0,00%
E1	7,36	7,36	7,36	8,28	8,28	8,28	0,92	11,11%	7,82	39,34	1 578,58	1 567,74	0,69%
F1	7,78	7,78	7,78	8,74	8,78	8,76	0,98	11,19%	8,27	39,36	1 868,22	1 855,20	0,70%
G1	7,18	7,12	7,15	8,16	8,18	8,17	1,02	12,48%	7,66	39,24	1 482,74	1 469,72	0,88%
A2	7,28	7,24	7,26	7,16	7,16	7,16	-0,10	-1,40%	7,21	40,08	1 251,97	1 251,85	0,01%
B2	8,20	8,44	8,32	7,92	7,92	7,92	-0,40	-5,05%	8,12	39,98	1 785,90	1 783,73	0,12%
C2	8,58	8,58	8,58	7,94	7,96	7,95	-0,63	-7,92%	8,27	40,18	1 895,91	1 890,42	0,29%
D2	8,08	8,08	8,08	7,96	7,96	7,96	-0,12	-1,51%	8,02	40,16	1 726,57	1 726,38	0,01%
E2	9,72	9,72	9,72	9,42	9,42	9,42	-0,30	-3,18%	9,57	40,28	2 943,45	2 942,01	0,05%
F2	8,68	8,80	8,74	8,70	8,70	8,70	-0,04	-0,46%	8,72	39,94	2 206,89	2 206,87	0,00%
G2	7,54	7,48	7,51	7,66	7,62	7,64	0,13	1,70%	7,58	39,86	1 444,00	1 443,79	0,01%
A3	8,40	8,40	8,40	8,50	8,50	8,50	0,10	1,18%	8,45	39,36	1 979,13	1 978,99	0,01%
B3	8,04	7,98	8,01	8,56	8,56	8,56	0,55	6,43%	8,29	39,56	1 878,92	1 874,79	0,22%
C3	9,04	9,04	9,04	9,62	9,70	9,66	0,62	6,42%	9,35	39,34	2 685,60	2 679,71	0,22%
D3	7,88	7,88	7,88	8,44	8,44	8,44	0,56	6,64%	8,16	39,26	1 781,81	1 777,62	0,23%
E3	7,64	7,70	7,67	8,60	8,70	8,65	0,98	11,33%	8,16	39,46	1 799,56	1 786,68	0,72%
F3	6,88	6,92	6,90	7,64	7,64	7,64	0,74	9,69%	7,27	39,42	1 268,77	1 262,23	0,52%
G3	7,94	8,06	8,00	8,54	8,52	8,53	0,53	6,21%	8,27	39,32	1 853,76	1 849,95	0,21%
A4	8,16	8,16	8,16	8,32	8,32	8,32	0,16	1,92%	8,24	39,70	1 851,28	1 850,93	0,02%
B4	7,98	7,98	7,98	8,56	8,52	8,54	0,56	6,56%	8,26	39,68	1 867,79	1 863,50	0,23%
C4	9,10	9,26	9,18	9,38	9,38	9,38	0,20	2,13%	9,28	39,80	2 651,23	2 650,61	0,02%
D4	8,00	8,06	8,03	8,42	8,50	8,46	0,43	5,08%	8,25	39,68	1 855,89	1 853,37	0,14%
E4	7,44	7,44	7,44	7,90	7,90	7,90	0,46	5,82%	7,67	39,48	1 487,18	1 484,51	0,18%
F4	7,00	6,96	6,98	7,84	7,88	7,86	0,88	11,20%	7,42	39,46	1 352,79	1 343,34	0,70%
G4	7,36	7,28	7,32	7,64	7,64	7,64	0,32	4,19%	7,48	39,52	1 379,55	1 378,29	0,09%
A5	9,00	9,22	9,11	8,60	8,54	8,57	-0,54	-6,30%	8,84	39,96	2 304,68	2 300,39	0,19%
B5	7,96	7,96	7,96	7,12	7,20	7,16	-0,80	-11,17%	7,56	40,14	1 453,40	1 445,31	0,56%
C5	7,38	7,38	7,38	6,82	6,80	6,81	-0,57	-8,37%	7,10	40,24	1 201,53	1 197,66	0,32%
D5	6,76	6,76	6,76	6,54	6,54	6,54	-0,22	-3,36%	6,65	40,14	984,23	983,70	0,05%
E5	7,38	7,38	7,38	7,36	7,36	7,36	-0,02	-0,27%	7,37	40,20	1 341,06	1 341,06	0,00%
F5	7,82	7,68	7,75	7,80	7,80	7,80	0,05	0,64%	7,78	40,42	1 583,16	1 583,13	0,00%
G5	7,60	7,62	7,61	7,22	7,24	7,23	-0,38	-5,26%	7,42	40,22	1 371,01	1 369,22	0,13%

#### 4.5.2 - Resultados por Simulação Numérica

Foi realizada simulação numérica por Elementos Finitos, através do programa Ansys, que após a execução até que houvesse a convergência entre a flecha experimental e a calculada pelo programa, obtendo assim, o Módulo de Elasticidade ( $E_n$ ), a Tensão de Ruptura média ( $\sigma_n$ ) e seus respectivos Coeficientes de Variação (C.V.), que resultou nas Tabela (4.16 e 4.17), sendo que a convergência dos dados ocorreu já na segunda reentrada da simulação.

Tabela 4. 16 - Módulo de Elasticidade Média ( $E$ ) e Coeficiente de Variação (C.V.) Por Simulação Numérica em SF e SA.

Propriedades / Grupo - Composição	Módulo de Elasticidade Média $E_n$ (GPa)		Coeficiente de Variação do $E_n$ C.V. (%)	
	SF	SA	SF	SA
25- Calcario 100%	13,26	14,46	6,0%	6,2%
16 - 90%Calc. + 10%Sint.	11,21	14,43	14,0%	6,0%
17 - 80%Calc. + 20%Sint.	11,32	12,59	12,0%	4,1%
18 - 70%Calc. + 30%Sint.	-	11,41	-	6,5%
19 - 60%Calc. + 40%Sint.	-	11,30	-	5,4%
20 - 50%Calc. + 50%Sint.	10,35	10,59	7,0%	5,0%
21 - 40%Calc. + 60%Sint.	9,02	10,27	9,0%	6,0%
22 - 30%Calc. + 70%Sint.	8,78	9,07	5,0%	2,9%
23 - 20%Calc. + 80%Sint.	-	8,04	-	10,1%
24 - 10%Calc. + 90%Sint.	7,00	7,43	6,0%	6,8%
27-Sintetico 100%	-	6,65	-	6%
26- Rejeito 100%	13,28	14,16	8,0%	7,3%
Média dos C.V. =			8,4%	6,1%

Tabela 4. 17 - Tensão Ruptura Média ( $\sigma_n$ ) e Coeficiente de Variação (C.V.) Por Simulação Numérica em SF e SA

Propriedades / Grupo - Composição	Tensão Ruptura Média $\sigma$ (MPa)		Coeficiente de Variação do $\sigma_n$ C.V. (%)	
	SF	SA	SF	SA
25- Calcario 100%	27,62	29,25	4,0%	4,1%
16 - 90%Calc. + 10%Sint.	28,70	29,37	8,3%	3,6%
17 - 80%Calc. + 20%Sint.	29,59	30,77	6,7%	4,8%
18 - 70%Calc. + 30%Sint.		30,58		5,6%
19 - 60%Calc. + 40%Sint.		30,85		6,4%
20 - 50%Calc. + 50%Sint.	30,99	30,55	7,0%	5,7%
21 - 40%Calc. + 60%Sint.	31,12	31,89	5,5%	5,1%
22 - 30%Calc. + 70%Sint.	31,70	31,88	6,9%	3,9%
23 - 20%Calc. + 80%Sint.		31,11		6,9%
24 - 10%Calc. + 90%Sint.	31,55	31,75	6,3%	3,3%
27-Sintetico 100%		31,63		6%
26- Rejeito 100%	32,63	33,34	6,7%	5,8%
Média dos C.V. =			6,4%	5,1%

## 4.6 - RESULTADO DAS MICROGRAFIAS E MACROGRAFIAS

### 4.6.1 - Aspectos Macrográficos.

Após a execução dos ensaios pode-se observar as formas diferentes de ruptura dos CPs analisados e registrar algumas das diferentes situações de ruptura que ocorreram. Na caracterização dos CPs foi traçada uma linha de referência central para posicionamento do atuador central. Ao se posicionar o atuador nela, foi ainda traçado nos CPs duas linhas (uma de cada lado, conforme Figura (4.38), de posicionamento do atuador. Essas marcações possibilitam, após a ruptura observar a ocorrência da seção de ruptura em relação à linha central de aplicação da força.

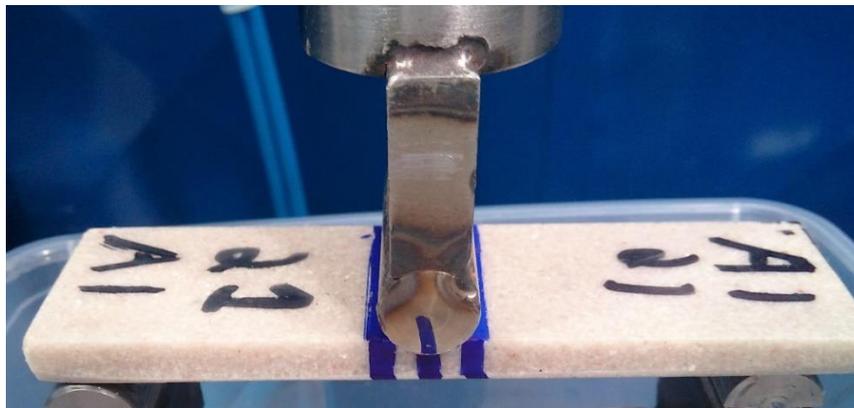


Figura 4. 38 - Posicionamento e caracterização do ponto de aplicação da carga.



Figura 4. 39 - CP DII do Grupo 25 após a fratura.

A Figura (4.40) mostra uma fratura no sentido transversal, e a Figura (4.41), mostra que a seção sofre variações no plano de ruptura. No detalhe da seção do CP CIV - 25 fraturado, mostra-se a presença de bolhas.

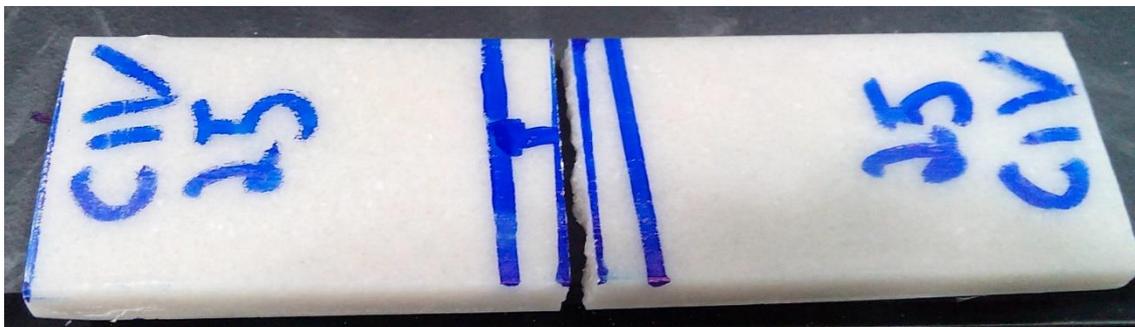


Figura 4. 40 - Fratura ocorrida transversalmente do CP CIV - 25.

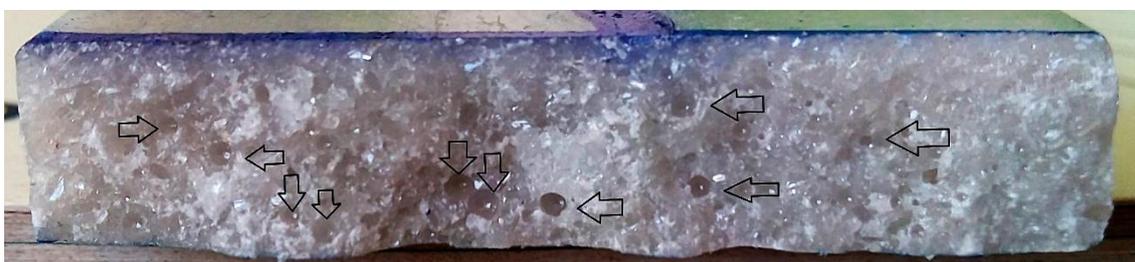


Figura 4. 41 - Detalhe de fratura ocorrida exatamente na região da atuação da força porem com desvios de acordo com presença de bolhas, CP CIV do Grupo 25.

Além das variações dentro de uma seção transversal, houve também, ocorrências que nem sempre ocorreu no centro de atuação da força, conforme Figura (4.42) ou ainda conforme mostra a Figura (4.43), adquirindo uma posição diagonal em relação ao eixo de atuação da carga.



Figura 4. 42 - Ocorrência de fratura fora do ponto central de apoio do atuador. Esse mesmo tipo de fratura, observado por cima, pode ser visto pela Figura (4.43).

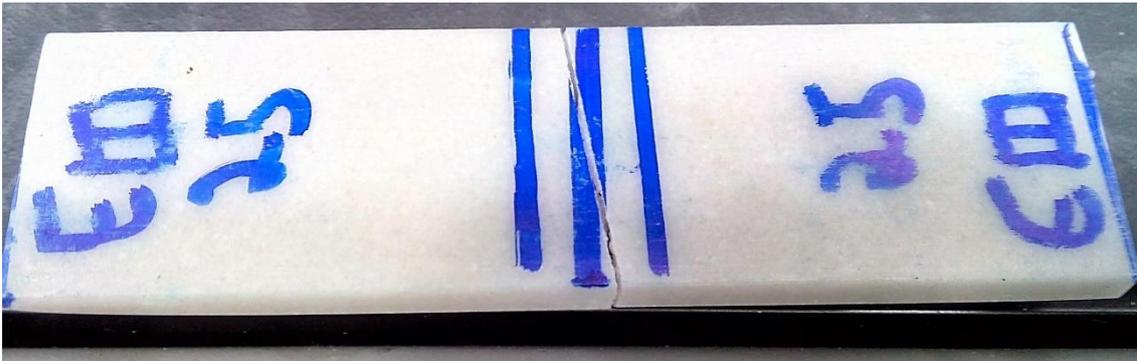


Figura 4. 43 - Fratura na diagonal do eixo de atuação da carga. CP EIII Grupo 25.

Podemos observar em relação as fraturas diagonais, que no grupo 43 (reciclado sintético de 2º ciclo), não houve nenhum caso de fratura diagonal, conforme Figura (4.44). Não foi possível a quantificação de todas as amostras, e classifica-las quanto à fratura, pois não havia sido observado nenhuma alteração sistemática, até a execução do Grupo 43.



Figura 4. 44 - Ensaio do grupo 43 sem ocorrência de fratura diagonal.

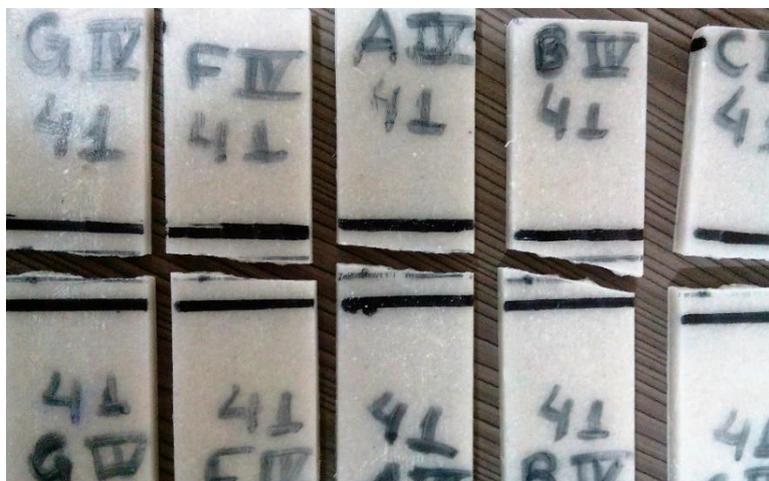


Figura 4. 45 - Detalhe da fratura do CP BIV do Grupo 41.



Figura 4. 46 - Grupo 41 com algumas fraturas em diagonal.

A fratura diagonal ais significativa do Grupo 41 ocorreu com o CP, BIV, conforme detalhe na Figura (4.42). Já o grupo 44 de 4ºciclo ocorreu fraturas semelhantes às da resina pura Figura (4.41, 4.42 e 4.43). A fratura dos CPs do grupo 44 ocorreram de forma totalmente diferente de todos os outros grupos analisados, na Figura (4.45), pode ser observado esta forma característica do Grupo, que ocorreu em praticamente todos os CPs.



Figura 4. 47 - CPs de Resina Pura após os Ensaio de Flexão.



Figura 4. 48 - CPs característicos do Grupo 44, reciclados de 4º ciclo

O Grupo 42 (3º ciclo) teve características intermediárias entre o Grupo 43 e o Grupo 44, com ocorrência de 8 fraturas com caracterizações parecidas com as ocorridas no Grupo 44, e no Grupo ara, bem como ocorrendo fraturas no plano central de atuação da força, como do Grupo 43, conforme Figura (4.49)



Figura 4. 49 - Fraturas do Grupo 42, características intermediárias entre 43 2º ciclo e 44 4º ciclo.

Outro aspecto que caracterizou número de ciclos, foi a tonalidade do produto final, como pode ser observado pela Figura (4.50), da tonalidade branca do calcário puro (Grupo 41) a um tom cinza escuro (Grupo 44).

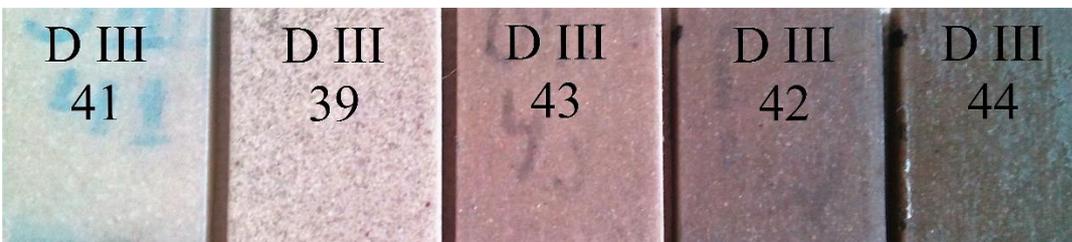


Figura 4. 50 - Tonalidade natural dos materiais sem nenhum tipo de pigmentação.

#### 4.6.2 - Aspectos Micrográficos.

Utilizando-se equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV, do Centro Regional de Tecnologia e Inovação (CRTI), no Polo de Inovação Tecnológica da Universidade Federal de Goiás (UFG), foi possível registrar micrografias referentes a quatro amostras de diferentes composições, (i) amostra do Grupo 4 - Rejeitos, (ii) amostra do Grupo 18 - 30% Sintético e 70% Calcário, (iii) amostra do Grupo 22 - 70% Sintético e 30% Calcário. As amostras foram avaliadas em duas faces cada, superfície superior (superfície moldada) e seção transversal (paralela à seção da fratura).

Da amostra 4 - Rejeitos, tiveram relevância as micrografias das Figuras (4.51), que mostram alguma variação na composição, em função das diferentes tonalidades das partículas, podendo ser evidenciado o descolamento da matriz polimérica, de partículas em torno de 5 $\mu$ m, a 300 $\mu$ m.

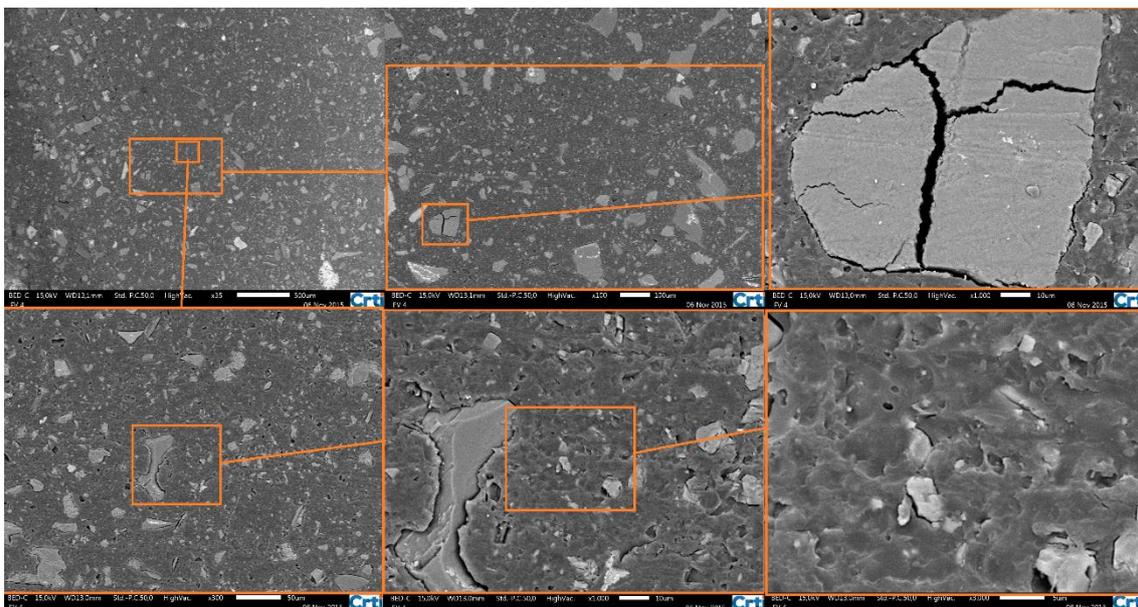


Figura 4. 51 - Evidências de descolamento entre matriz polimérica e partículas de carga, bem como evidências de aderência de partícula fissurada por possível aderência na matriz polimérica.

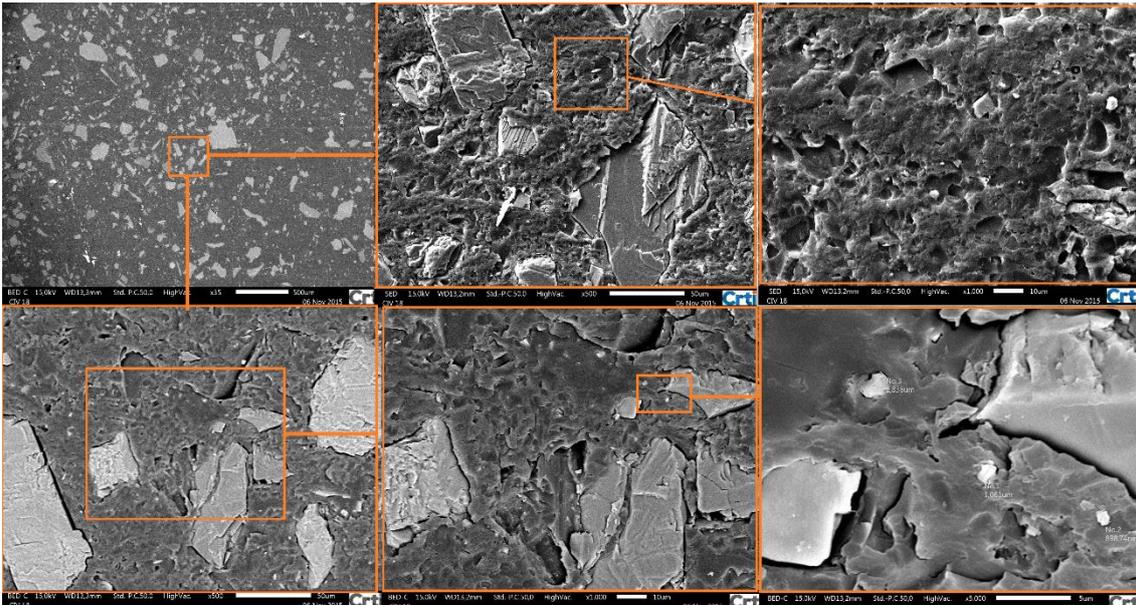


Figura 4. 52 - Micrografias do CP 18 - CIV, mostra falta de aderência entre partículas e polímero, com espaços vazios entre eles.

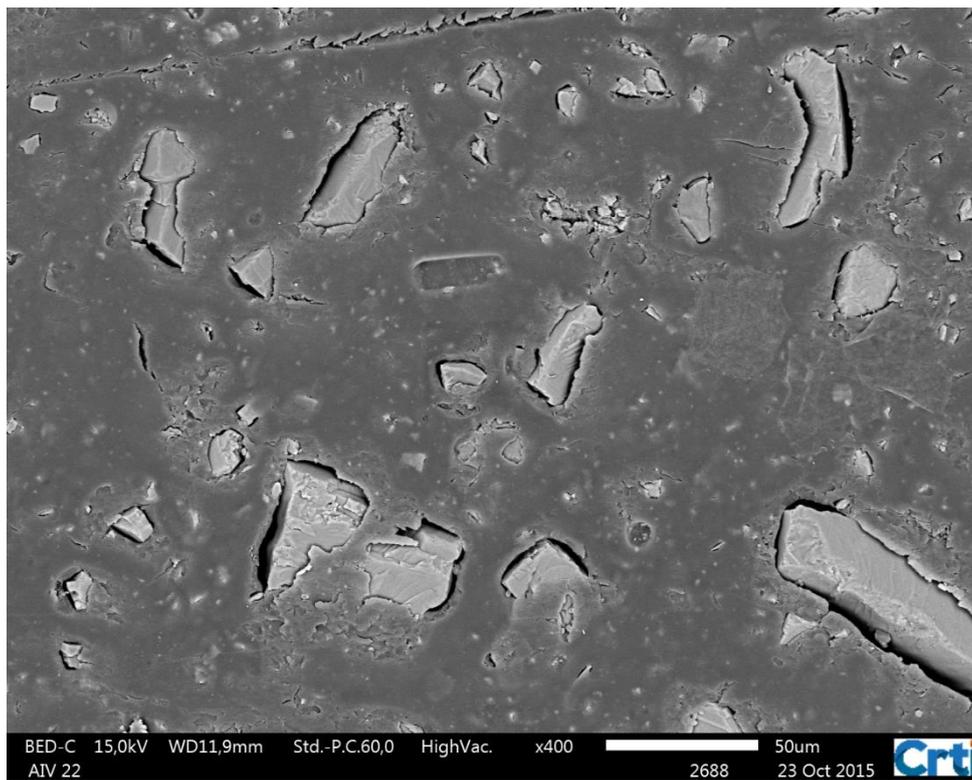


Figura 4. 53 - CP AIV do Grupo 22, partícula descoladas da matriz poliméricas

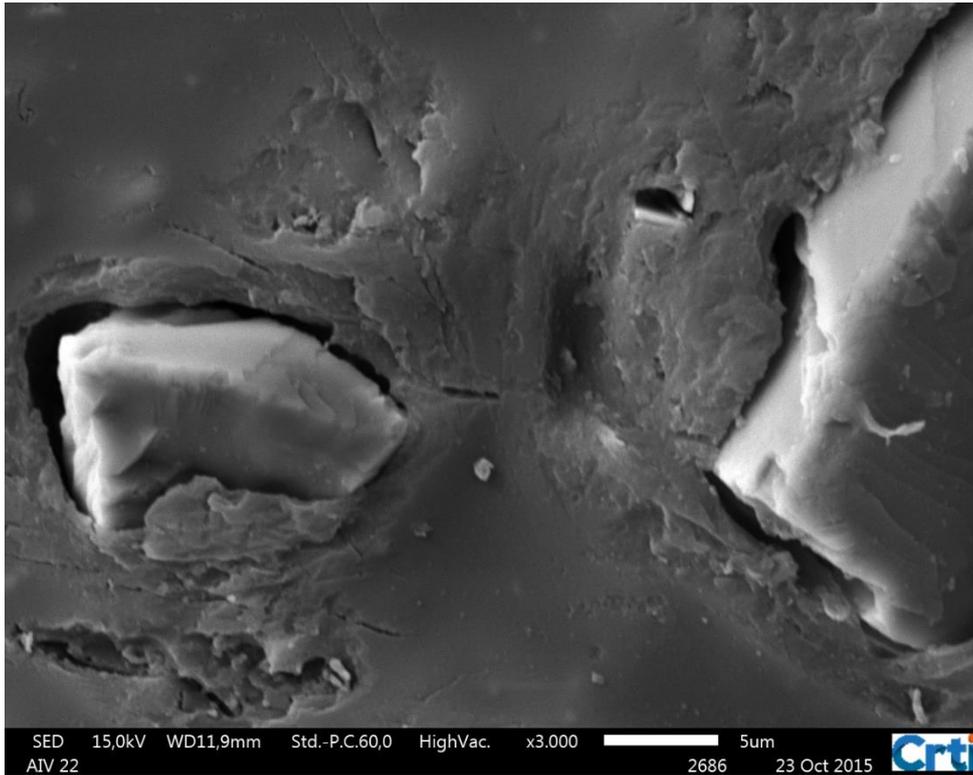


Figura 4. 54 - Partículas minerais totalmente sem interface com a matriz polimérica.

## 5 - ANÁLISES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.

Nesta investigação experimental e teórica foram ensaiados cerca de 800 CPs, com dois tipos de suporte (fixo e articulado). Diante deste imenso universo, este capítulo foi organizado em cinco temas principais, focalizando: as influências do acréscimo gradual de carga reciclada, do desgaste da face superior dos CPs, e dos ciclos de reutilização; bem como observações macro e micrográficas dos materiais ensaiados, e simulações numéricas das deformações dos vários tipos de CPs.

### 5.1 - CPS EQUIVALENTES ENSAIADOS EM SUPORTE FIXO E ARTICULADO, E COM ACRÉSCIMO GRADUAL DE RECICLADOS

#### 5.1.1 - Avaliação da Resistência Intrínseca ( $\sigma_0$ ), quanto ao tipo de Suporte, Fixo e Articulado, e ao Acréscimo Gradual de Reciclados.

A Tabela (5.1) mostra a diferença entre os resultados obtidos nos Grupos 25, 16, 17, 20, 21, 23, 24 e 27, em relação aos ensaios com os dois tipos de Suportes de ensaio de flexão, Suporte Articulado (SA) e Suporte Fixo (SF). Já as Figuras (5.1 e 5.2), deste item (5.1.1), e Figuras (5.3 a 5.8), nos próximos itens (5.1.2 a 5.1.4), ilustram os resultados obtidos nesses Grupos e os comparam os entre os dois tipos de Suporte, SA e SF, bem como a evolução das propriedades e características dos CPs, ao se acrescentar material reciclado, em relação à carga mineral natural, em porcentagens cada vez maiores.

Tabela 5. 1 - Diferenças entre resultados obtidos com Suporte Fixo e Suporte Articulado dentro do mesmo Grupo de ensaio com **mesma composição**.

Grupos Comparados internamente entre SA e SF	Diferença na Res. Intrínseca $\frac{((\sigma_0)_{SA} - (\sigma_0)_{SF}) \cdot 100}{(\sigma_0)_{SA}}$ (%)	Diferença no Módulo de Weibull $\frac{((m)_{SA} - (m)_{SF}) \cdot 100}{(m)_{SA}}$ (%)	Diferença no Módulo Elasticidade $\frac{((E)_{SA} - E)_{SF}) \cdot 100}{(E)_{SA}}$ (%)	Diferença do Coeficiente do (E) $C.V._{SA} - C.V._{SF}$ (%)
26- Rejeito 100%	3,1%	59,4%	5,2%	-2,4%
24- 10% Calc.+ 90% Sint.	2,3%	22,2%	5,2%	-1,4%
23- 30% Calc.+ 70% Sint.	0,6%	13,4%	5,0%	-0,7%
21- 40% Calc.+ 60% Sint.	1,2%	-0,7%	14,0%	-1,9%
20- 50% Calc.+ 50% Sint.	-1,6%	33,5%	3,6%	-2,7%
17- 80% Calc.+ 20% Sint.	2,9%	45,7%	13,5%	-8,1%
16- 90% Calc.+ 10% Sint.	1,2%	51,6%	21,3%	-5,2%
25- Calcário 100%	5,7%	8,8%	9,1%	-0,5%
Média das Diferenças	<b>1,9%</b>	<b>29,2%</b>	<b>9,6%</b>	<b>-2,9%</b>

A Resistência Intrínseca,  $\sigma_0$ , quando avaliada em ensaios com o Suporte Articulado (SA), foi superior em 7 ensaios, em relação a CPs comparáveis e testados com o Suporte Fixo (SF), com diferença média de +1,9%, e variação máxima de +5,7% no Grupo 25. Sendo que o único Grupo que apresentou variação negativa (i.e. a Resistência Intrínseca obtida em SF maior que em SA), foi o Grupo 20. Esses resultados mostram que ambos os tipos de Suporte alcançam valores bem próximos em relação à Resistência Intrínseca do Material, uma vez que a Tensão de Ruptura, tem um C.V. médio nesses mesmos grupos de 5,2%, ou seja, a variação interna do Grupo é maior que as diferenças entre as resistências intrínsecas relativas aos Suportes SF e SA.

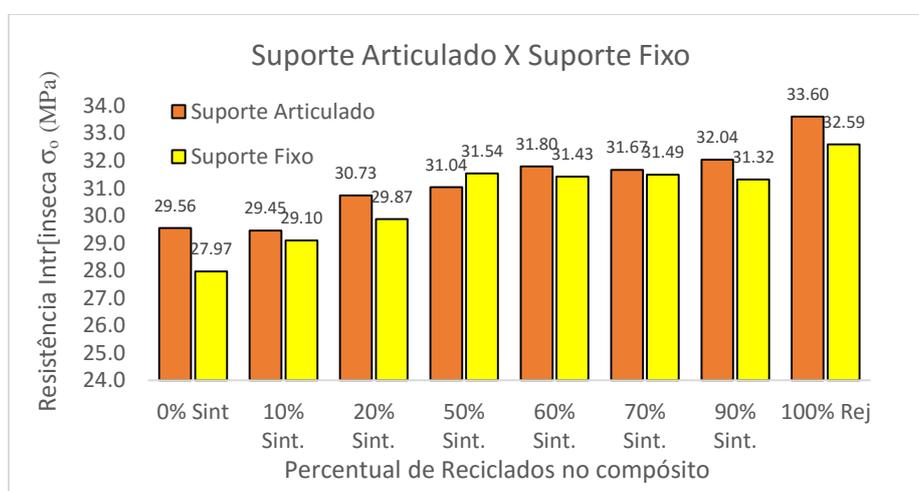


Figura 5.1 - Comparação de Valores de  $\sigma_0$  entre ensaios com SA e SF.

Já avaliando o comportamento da Resistência Intrínseca, em relação ao acréscimo de reciclados sintéticos, pode ser observado através da tendência na Figura 5.2), que existe uma variação crescente na medida em que se aumenta o teor de reciclados para o SA, enquanto que no SF existe uma estagnação a partir de 50% de acréscimo. Assim, apesar dos comparativos entre os grupos internos (SF e SA), estarem dentro do índice do Coeficiente de Variação C.V., a tendência comportamental do grupo se altera quando ocorre a mudança de suporte de ensaio, de SF para SA.

Em resumo, a Resistência intrínseca não tem variações significativas de seus valores, com a alteração do suporte de ensaio de Flexão, quando comparada internamente ao Grupo avaliado. O fato da resistência intrínseca do mármore sintético aumentar ligeiramente com o aumento da porcentagem de reciclados, é uma perspectiva benéfica no que

concerne ao reaproveitamento de rejeitos industriais de mármore sintético para produzir mais peças deste material. Tanto do aspecto ambiental, pois estes rejeitos são um tipo de lixo de difícil degradação, bem como no econômico pois o rejeito pode ser obtido praticamente de graça.

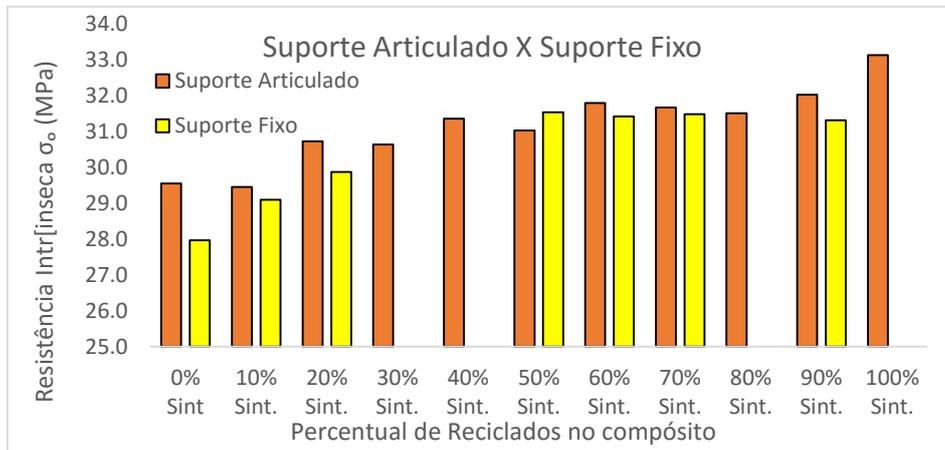


Figura 5.2 - Variação da Resistência Intrínseca,  $\sigma_0$ , com o acréscimo de Reciclados.

### 5.1.2 - Avaliação do Módulo de Weibull ( $m$ ), quanto aos suportes SA e SF e o Acréscimo Gradual de Reciclados.

Ao avaliar-se individualmente os valores do Módulo de Weibull ( $m$ ), de cada Grupo, percebe-se uma variação positiva do SA em relação ao SF em sete dos oito Grupos estudados. E uma equiparação no Grupo 21 (60% de reciclados). O maior  $m$  indica uma menor dispersão dos resultados da tensão de ruptura, Hull e Clyne (2005). Nesta avaliação, em média, o SF teve 30% a mais de dispersão, levando-se em consideração as diferenças entre os Módulos de Weibull ( $m$ ) ensaiados no SA e no SF, ver Figura (5.3).

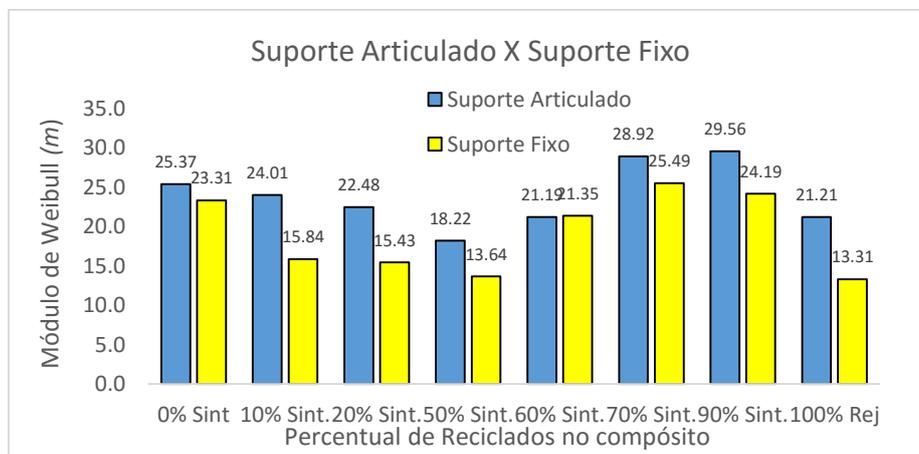


Figura 5.3 - Dispersão dos resultados do Módulo de Weibull ( $m$ ).

No conjunto, a variação do Módulo de Weibull ( $m$ ) no SF, possui uma estagnação com leve tendência de queda ao acrescentar reciclados na composição dos CPs, Figura (5.4), apesar de uma grande variação entre os grupos 70%, 80%. 90% e 100%, com Weibull médio de  $m_{SA} = 23,87$  e  $m_{SF}=19,07$  Tabela (5.2).

Tabela 5. 2 - Média do Módulo de Weibull e Coeficiente de Variação C.V.

Valores Médios	TIPO DE SUPORTE	
	FIXO	ARTICULADO
Módulo de Weibull	19,07	23,87
C.V.	23%	18%

Já o SF apresenta uma melhora no valor do Módulo de Weibull de  $\approx 20\%$ , com tendência crescente, ao se acrescentar reciclados. Essa análise poderá ser complementada com a avaliação do item (5.3), onde serão avaliadas as reciclagens consecutivas, indicando assim com maior contundência qual dessas tendências é mais provável, de acréscimo, estagnação ou decréscimo, do valor do Módulo de Weibull.

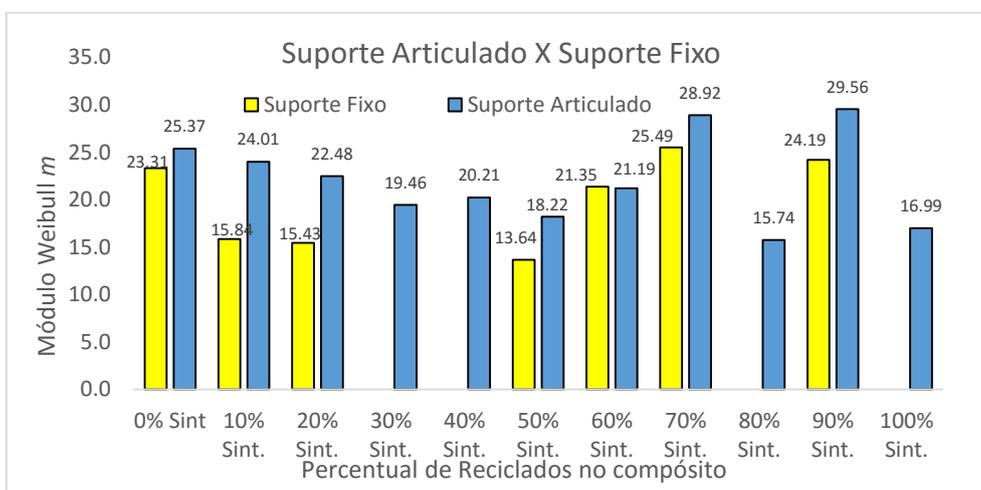


Figura 5.4 - Avaliação do Módulo de Weibull ( $m$ ), com a variação do percentual de reciclados.

### 5.1.3 - Análise do Módulo de Elasticidade (E), quanto ao Suporte Fixo e Articulado, e Acréscimo Gradual de Reciclados.

O Módulo de Elasticidade, dos CPs ensaiados, com o SA suporte articulado, teve resultados em média 9,61% maiores, em relação aos SF, em todos os grupos analisados. Nos grupos de maior módulo essa diferença foi maior como pode ser observado pelo

gráfico da Figura (5.5) e pela Tabela (5.1). A ação do Suporte articulado pode ter contribuído fortemente para as diferenças apresentadas nesses ensaios. Como mostrado no capítulo 3, item (3.2.2), a motivação para a confecção de um novo suporte de ensaio ocorreu exatamente pela grande dificuldade em acertar a superfície inferior dos CPs, que possuíam diferença de espessura ao longo do CP, e que como mostrado pelas Figuras (3.15 e 3.16), ficavam em falso nos apoios, que eram acertados manualmente, pelo operador, mas sem garantias de que toda correção havia sido executada com exatidão. Estando a peça com algum empeno ou diferença de espessura, que a fizesse ficar em falso no apoio, parte do deslocamento seria produzido durante esse ajustamento de torção da própria peça, durante o processo de ensaio de flexão. Essa função de ajustar o apoio, é exatamente o papel da articulação do SA, que após uma aplicação de pré-carga em torno de 30N, eliminava todo e qualquer deslocamento em falso ou de torção que pudesse interferir nos Cálculo do Módulo de Elasticidade. As diferenças maiores estão relacionadas aos Módulos de Elasticidade maiores, que podem ser relacionadas ao fato de que quanto mais rígidas são as peças, maior a força necessária para corrigir um mesmo desnível de apoio.

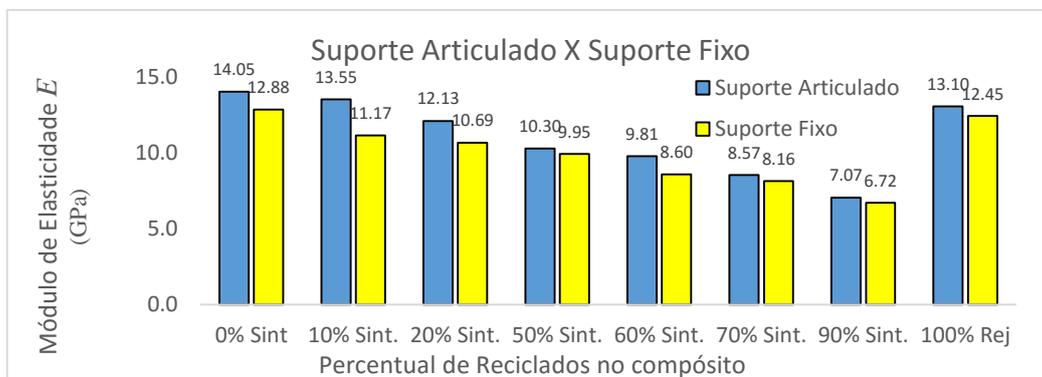


Figura 5. 5 - comparação entre valores do Módulo de Elasticidade  $E$ , de CPs ensaiados nos Suportes Fixo e Articulado.

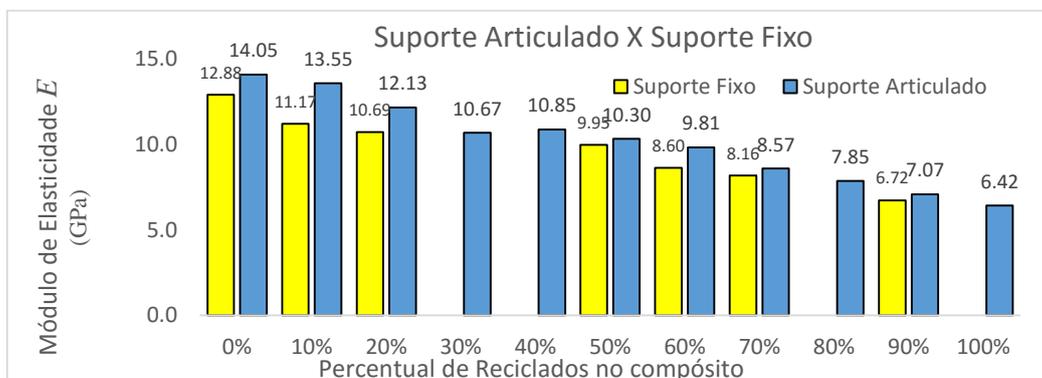


Figura 5. 6 - Avaliação do Módulo de Elasticidade  $E$  com o aumento gradual de reciclados.

O Módulo de Elasticidade sofreu grandes variações, de forma gradual e contínua tanto em ensaios com SA como no SF, a tendência fica bem clara quando observamos o gráfico da Figura (5.6), onde pode ser observado um decréscimo de cerca 50% em ambos os casos quando da adição de 90% de reciclados, no caso do SF, e de 100% de reciclados, nos ensaios com SA. Essa tendência deve ser também evidenciada nos ciclos subsequentes de reciclagens.

#### 5.1.4 - Análise do Coeficiente de Variação (C.V.) no Módulo de Elasticidade (E), quanto ao Suporte Fixo e Articulado, e Acréscimo Gradual de Reciclados.

A importância da análise do Coeficiente de Variação (C.V.), está, na relação com a confiabilidade dos valores encontrados do Módulo de Elasticidade ( $E$ ), em função da dispersão dos resultados. Assim, avaliando os resultados dentro dos grupos entre os diferentes tipos de suportes, encontramos em oito Grupo avaliados, sete que tiveram resultados de dispersões no Módulo de Elasticidade em SA, menores em média, 2,9%, que os realizados em SF. Nos Grupos 16 (10% sint.) e 17 (20% sint.), a 5,2% e 8,1% de diferença, respectivamente, como pode ser observado na Figura (5.7).

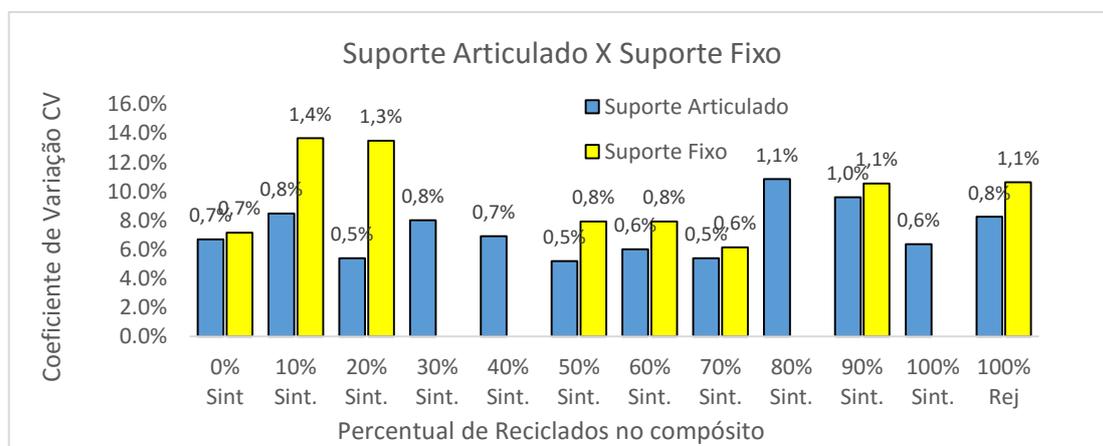


Figura 5. 7 - Avaliação do Coeficiente de Variação C.V. dos resultado do Módulo de Elasticidade, comparando SA com SF.

Vale ressaltar que na avaliação do Módulo de Elasticidade  $E$ , os valores ficaram com as maiores diferenças entre eles, também nos Grupos 16 (10% Sint.) e 17 (20% Sint.), no entanto os grupos 25 (0% Sint.) e 22(70% Sint.) tiveram diferenças entre os C.V. baixa, sendo que a variação do  $E$  chegou a 14% no 21 e a 9,1% no 25. Esses dados corroboram com uma possível instabilidade do suporte, SF, na execução destes Grupos, mesmo analisando grandezas diferentes. Quando comparamos com a análise Weibull para os grupos 16 e 17, não houve significativa variação para Resistência Intrínseca medida por

Weibull, quando analisado os ensaios destes Grupos realizados pelo SA, já para o SF, houve a maior variação de Weibull avaliada entre os Grupos.

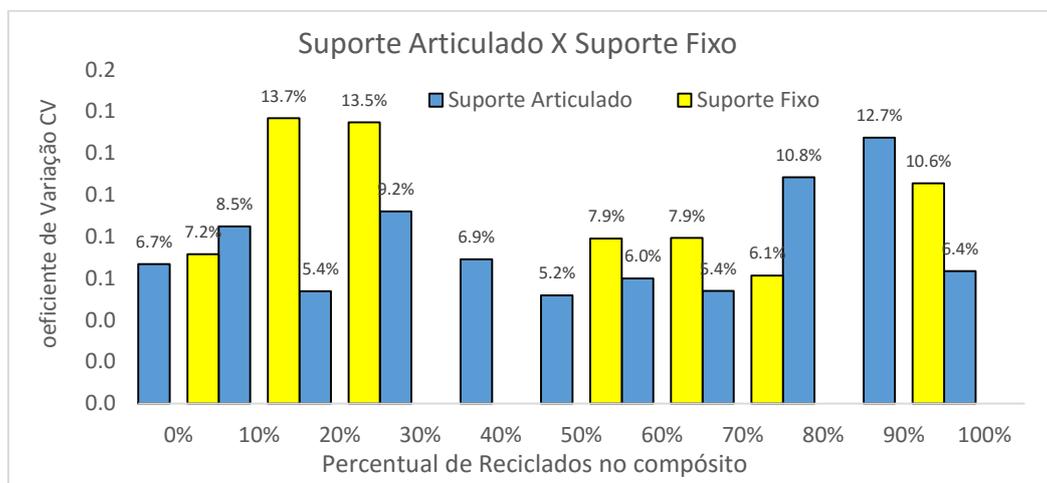


Figura 5. 8 - Tendência do Coeficiente de Variação C.V., do Módulo de elasticidade com o aumento de reciclados na composição dos CPS.

Da mesma forma avaliada em Weibull, os dois suportes apresentam tendências de variações com diferentes projeções, enquanto o Coeficiente de Variação (C.V.), no SF tende a ser menor com a adição de reciclados sintéticos. O CPs ensaiados com o SA tendem a ter aumentada o C.V., com suave ascendência, na medida que se aumenta a quantidade de reciclados.

## 5.2 - CPs EQUIVALENTES ENSAIADOS, COM E SEM DESBASTE SUPERFICIAL, QUANTO AOS CICLOS DE RECICLAGEM CONSECUTIVOS.

Após a coleta de dados pode-se comparar os resultados de forma interna aos Grupos 42, 43 e 44, avaliando-se o comportamento das propriedades, Resistência Intrínseca  $\sigma_0$ , Módulo de Weibull  $m$ , Módulo de Elasticidade  $E$  e Coeficiente de Variação C.V., dos CPs quanto ao Desbaste Superficial (com e sem desbaste) e de forma geral, entre os Grupos 39, 41, 42, 43 e 44, avaliando-se essas propriedades quanto às reciclagens consecutivas.

A Tabela (5.3) mostra as diferenças encontradas para as comparações entre os Grupos 42, 43 e 44, e permite a partir dela obter uma análise individual de cada propriedade ou características, analisadas nos itens (5.2.1 a 5.2.4) a seguir.

Tabela 5.3 - Diferenças entre resultados obtidos em CPs ensaiados Com e Sem Desbaste, dentro do mesmo Grupo de ensaio com mesma composição

Grupos Comparados internamente em Ensaio Com e Sem Desbaste Superficial		Diferença da Res. Intrínseca ( $\sigma_0$ ) Com e Sem Desbaste (%)	Diferença entre Módulo de Weibull Com e Sem Desbaste (%)	Diferença entre o Módulo de Elasticidade (E), Com e Sem Desbaste (%)	Diferença do Coeficiente de C.V. de E Com e Sem Desbaste (%)
35 CPs	Gr.43 2ºciclo	9,12%	15,14%	-19,30%	-6,52%
32 CPs	Gr.42 3ºciclo	11,45%	55,56%	-3,13%	-2,86%
35 CPs	Gr.44 4ºciclo	8,93%	45,60%	11,79%	0,13%
Médias das Diferenças		<b>9,83%</b>	<b>38,77%</b>	<b>-3,55%</b>	<b>-3,08%</b>

### 5.2.1 - Avaliação da Resistência Intrínseca ( $\sigma_0$ ), quanto ao Desbaste Superficial e Quanto aos Ciclos de Reciclagem Consecutivos

Ao avaliar-se as alterações da Resistência Intrínseca  $\sigma_0$ , entre ensaios com e sem desbaste, pode-se destacar uma perda 9,83% em média nesta propriedade. Como os desbastes nos CPs ocorreram na parte inferior dos CPs, para regularização da espessura, Há evidências portanto, de que essa camada superficial inferior dos CPs, possuem influência direta, na Resistência Intrínseca do material analisado. Essa evidência também pode ser observada pela Figura (5.9)

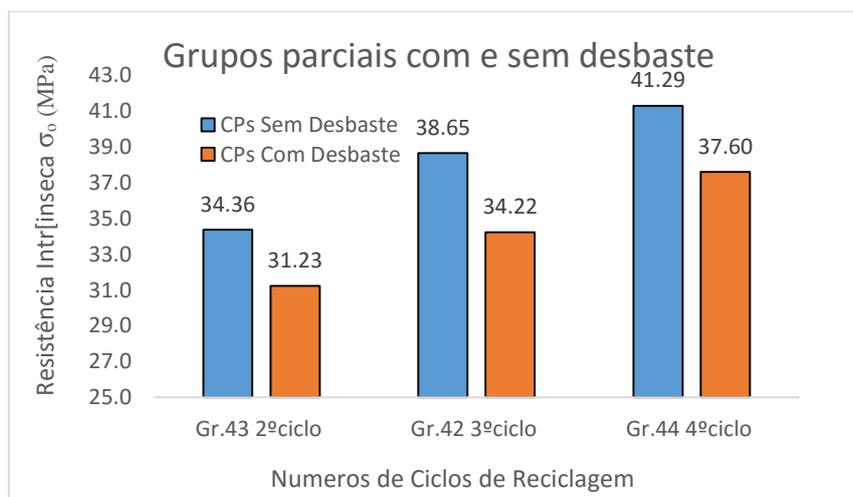


Figura 5. 9 - Avaliação da Resistência Intrínseca quanto ao desbaste superficial inferior do CPs.

Analisando a variação dos ciclos de reciclagem, observa-se um crescimento gradual em média, entre os ciclos, de aproximadamente  $\approx 2,5$  MPa por ciclo, para os CPs sem desbastes e de  $\approx 3,0$  MPa por ciclo, para os CPs com desbastes, como pode ser observado na figura (5.10).

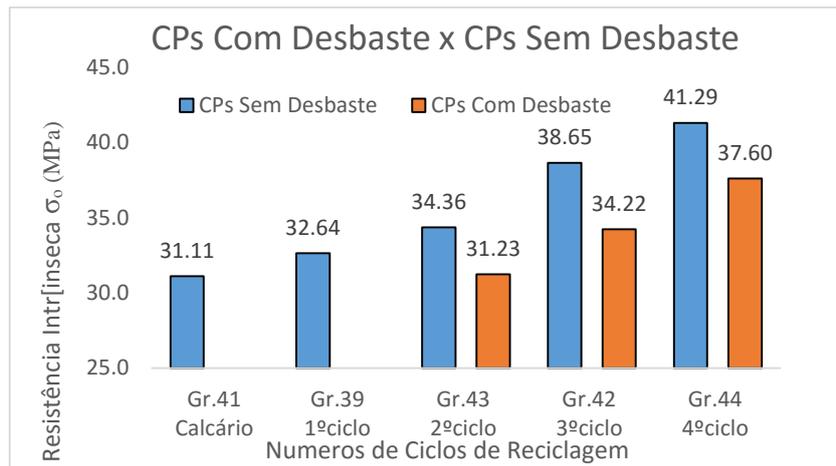


Figura 5. 10 - Comportamento da Resistência Intrínseca quanto à variação do número de ciclos

O crescimento da Resistência Intrínseca  $\sigma_0$ , com o aumento dos ciclos ocorre nos dois tipos de CP (com Desbaste e sem Desbaste). Nos sem Desbaste, a uma taxa que varia de 5,0% do Calcário 100% (Grupo 41) para o 1º ciclo (Grupo 39), a 12,5% do 2º ciclo (Grupo 44) para o 3º ciclo (Grupo 42), ficando na média, com um crescimento a cada ciclo  $\approx 7,5$  MPa e um crescimento total de 32,0% até o 4º ciclo. Já nos CPs com Desbaste e esse crescimento foi ainda mais significativo, chegando em média a 9,8 % por reciclagem. A presença de material polimérico poderá evidenciar, portanto, o melhor desempenho nos resultados da Resistência Intrínseca  $\sigma_0$ , a cada aumento de ciclo. A Figura (5. 11) mostra a evolução desse acréscimo de polímeros na composição total do CPs.

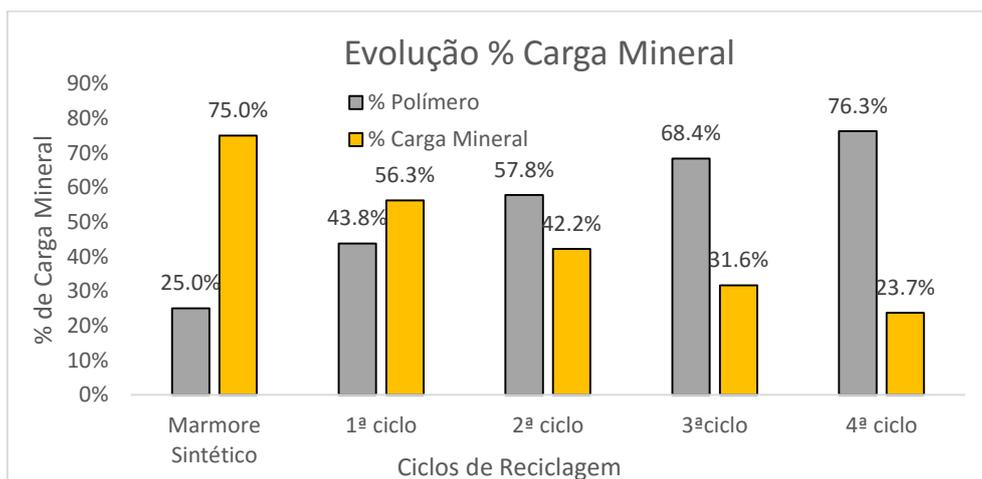


Figura 5. 11 - Composição polímero x carga mineral a cada ciclo

### 5.2.2 - Avaliação do Módulo de Weibull ( $m$ ), Quanto ao Desbaste Superficial e Quanto aos Ciclos de Reciclagem Consecutivos

O módulo de Weibull, tem uma diminuição de 38,8 % em média quando os CPs sofrem desbaste superficial. O desbaste foi realizado na expectativa de provocar uma melhor regularidade nos ensaios de Flexão, em função da irregularidade geométrica dos CPs, e ao observar a Figura (5.11), pode-se perceber que a dispersão dos resultados é fortemente afetada pelo acabamento superficial inferior dos CPs.

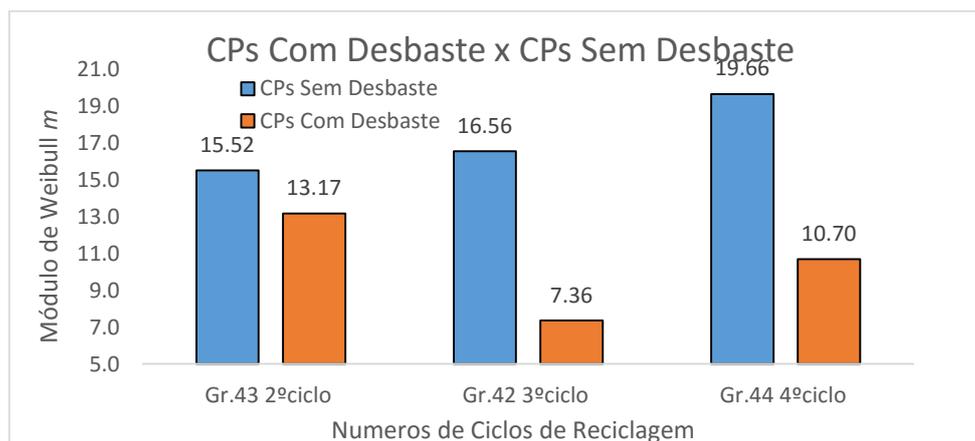


Figura 5. 12 - Módulo de Weibull ( $m$ ), quanto ao desbaste superficial

O comportamento geral do Módulo de Weibull, possui uma tendência de diminuição na medida em que se avança o número de ciclos, e através da Figura (5.12), é possível visualizar que esta tendência se aproxima do Módulo de Weibull encontrado para o Grupo ara, que é produzido com 100% de resina polimérica.

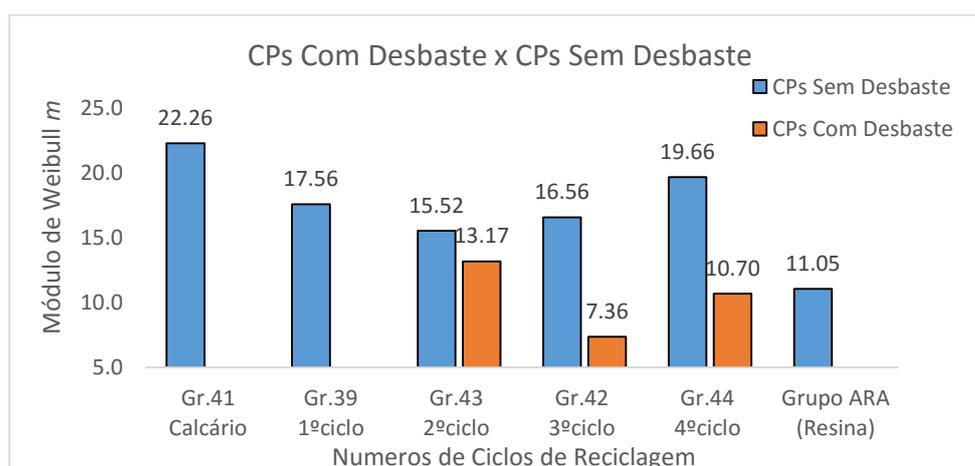


Figura 5. 13 - Módulo de Weibull ( $m$ ), quanto aos ciclos de reciclagem consecutivos

Vale ressaltar que a cada ciclo diminui a presença de carga mineral presente no compósito, e ao mesmo tempo aumenta a presença de material polimérico, sendo que a cada ciclo acrescenta-se 25% de resina poliéster, como pode ser observado na Figura (5.13), Assim, no 4º ciclo inverte-se a composição inicial com 76,3% de polímeros e 23,7 de carga mineral, sendo que somente 25% desse polímero reage na formação das cadeias poliméricas a cada ciclo, o restante do material polimérico está presente como carga associada à carga mineral. Uma importante consequência disso é que a densidade diminui significativamente. Por exemplo, de cerca de 2,09 g/cm<sup>3</sup> para os CPs com 100% de carga de Calcário (Grupo 25), para 1,23 g/cm<sup>3</sup> para os CPs de 4º ciclo (Grupo 44).

### 5.2.3 - Análise do Módulo de Elasticidade ( $E$ ), Quanto ao Desbaste Superficial e Quanto aos Ciclos de Reciclagem Consecutivos

Ao se comparar o Módulo de Elasticidade em CPs com e Sem Desbaste, constata-se que a diferença entre as duas condições diminui a cada ciclo, sendo que no 2º ciclo é de 0,69 GPa a mais no grupo com desbaste e no 4º ciclo inverte para 0,20 GPa a mais no grupo sem desbaste, indicando uma menor influência do desbaste, no Módulo de Elasticidade, na medida em que aumenta o percentual de material polimérico no compósito analisado. Conforme se observa na Figura (5.14).

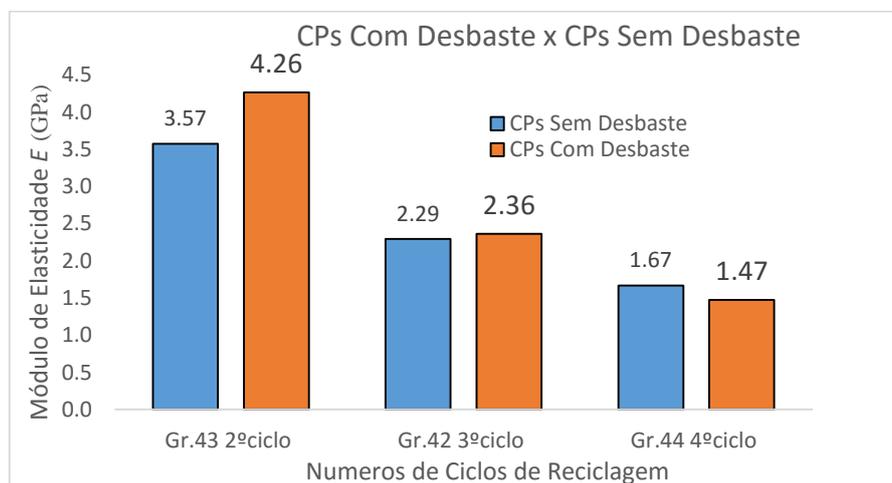


Figura 5. 14 - Módulo de Elasticidade  $E$  no CPs Sem Desbaste e Com Desbaste

De forma geral a diminuição do Módulo de Elasticidade, ao se avançar nos ciclos de reciclagem até o 4º ciclo, é bastante expressiva, tendo uma redução 680% em relação mármore sintético produzido com calcário como carga, conforme Figura (5.15)

É possível ainda avaliar sobre o gráfico de Figura (5.15) que a partir do 3º ciclo o Módulo de Elasticidade se torna menor que o do Grupo produzido com resina pura.

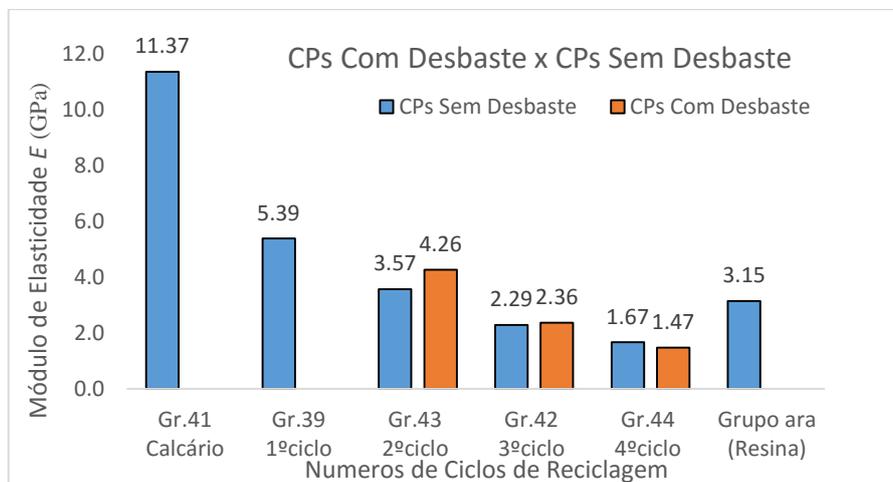


Figura 5. 15 - Comportamento do Módulo de elasticidade  $E$  com aumento dos Ciclos.

#### 5.2.4 - Análise do Coeficiente de Variação (C.V.) no Módulo de Elasticidade ( $E$ ), Quanto ao Desbaste Superficial e Quanto aos Ciclos de Reciclagem Consecutivos.

O coeficiente de Variação C.V., acompanha o comportamento do Módulo de Elasticidade  $E$ , diminuindo as diferenças ocorridas com o aumento dos ciclos, Figura (5.16). Esse comportamento reforça a possibilidade de, em havendo uma camada superficial na parte inferior do CP diferente da composição do restante do CP, a retirada desta terá influência menor quão menor for a sua diferença de composição do restante do material.

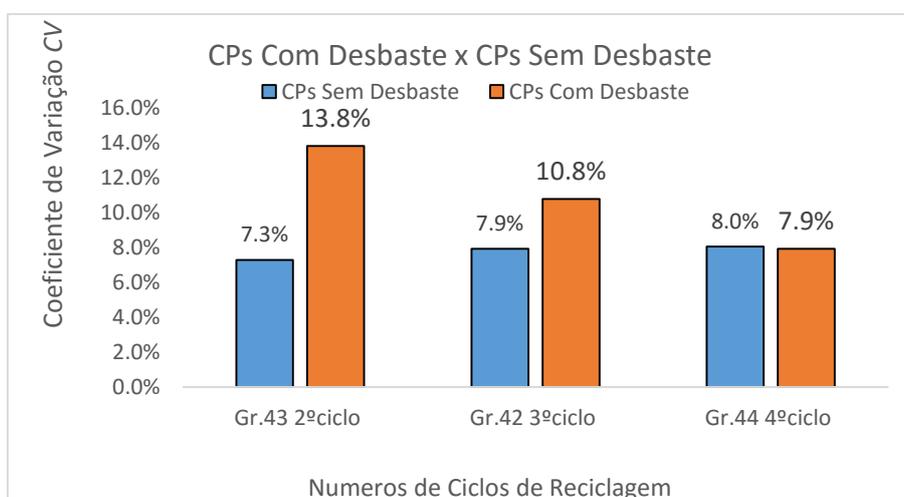


Figura 5. 16 - Coeficiente de Variação do Módulo de Elasticidade em relação ao desbaste do CP.

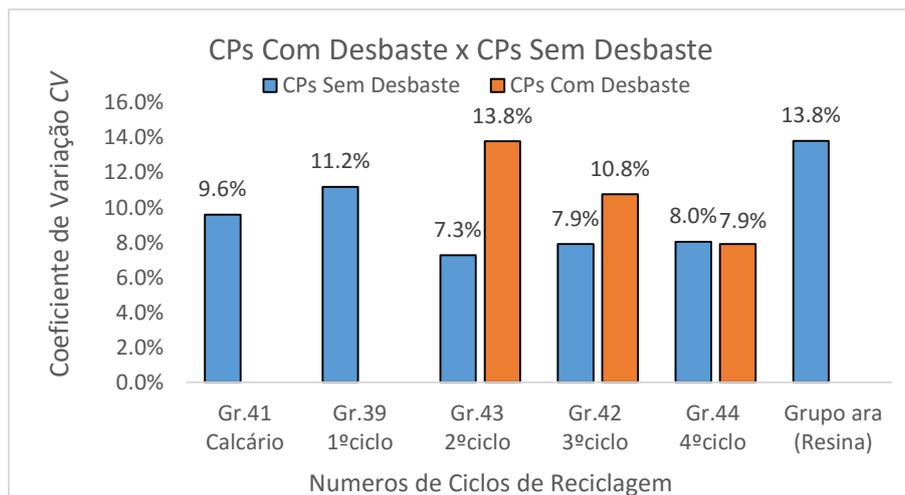


Figura 5. 17 - Tendência de evolução do C.V. em relação aos ciclos.

Na média o C.V. do módulo de elasticidade  $E$ , se manteve abaixo do valor encontrado para Grupo ara, porem os CPs Sem Desbaste, apresentam a uma menor dispersão dos resultados de forma geral, em relação aos CPs que sofreram desbaste.

### 5.3 - QUANTO À REUTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINERAIS E SINTÉTICOS.

Como forma de facilitar a comparação dos dois diferentes tipos de cargas primarias, utilizados como matéria prima, Rejeito e Calcário, os Grupos serão avaliados por Matéria Prima Mineral (Grupos 25 e 26) e Matéria Prima Sintética (Grupos 27 e 32).

Avaliando os resultados quanto aos tipos de reciclados utilizados neste estudo, é importante ressaltar a grande diferença encontrada na Resistência Intrínseca  $\sigma_0$ , dos CPs entre os grupos que utilizaram rejeitos de marmorarias, e os que utilizaram calcário. Essa diferença, conforme a Figura 5.18, que é de  $\approx 10\%$ , se mantem do primeiro para o segundo ciclo dos rejeitos. Esse valor, 3,5 MPa, é similar ao ganho do 1º ciclo de reciclagem, do Grupo 25 (calcário 100%), para o Grupo 27 (sintético 100%). A Resistência intrínseca é do material reaproveitado, ainda mineral, 13,6% maior que a do calcário utilizado pela primeira vez como matéria Prima. Ainda em relação a Resistência Intrínseca é válido afirmar que o processo de reciclagem agrega valores a cada ciclo de forma similar nos dois tipos Matérias Primas minerais.

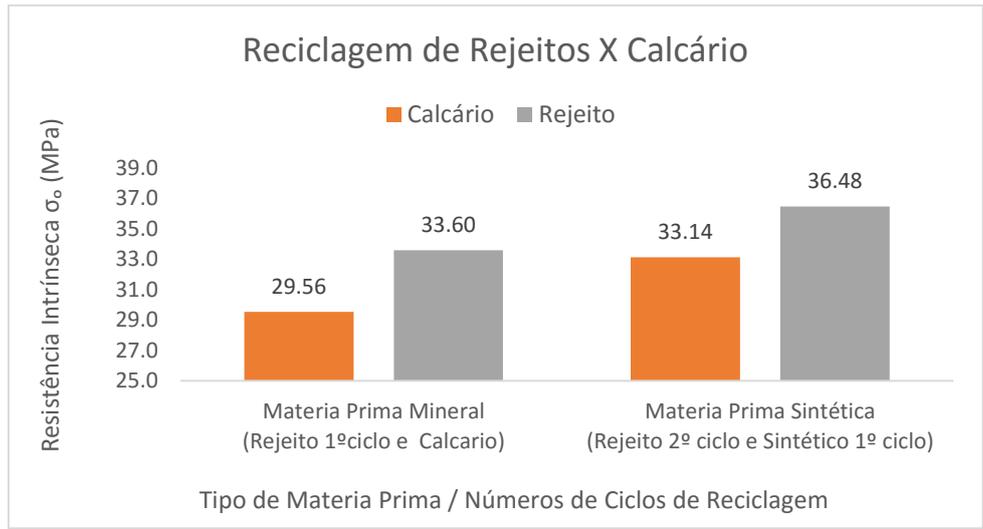


Figura 5. 18 - Variação da Resistência Intrínseca de acordo com tipo de matéria prima, Mineral e Sintética.

Em Relação ao Módulo de Weibull, uma estabilidade maior dos CPs provindos do Rejeito (1º e 2º ciclos), que apresenta uma variação menor, de 0,8, do primeiro para o ciclo, enquanto que os dois Grupos providos do Calcário apresentam variação de 8,3. Apesar de na média os valores de Weibull, entre os de originados de Rejeito,  $m = 20,82$ , e os de Calcário,  $m = 21,18$ , serem próximos, pode-se afirmar que a reciclagem de rejeitos apresenta melhor repetibilidade na reciclagem de mineral para sintético, (1º para o 2º ciclo).

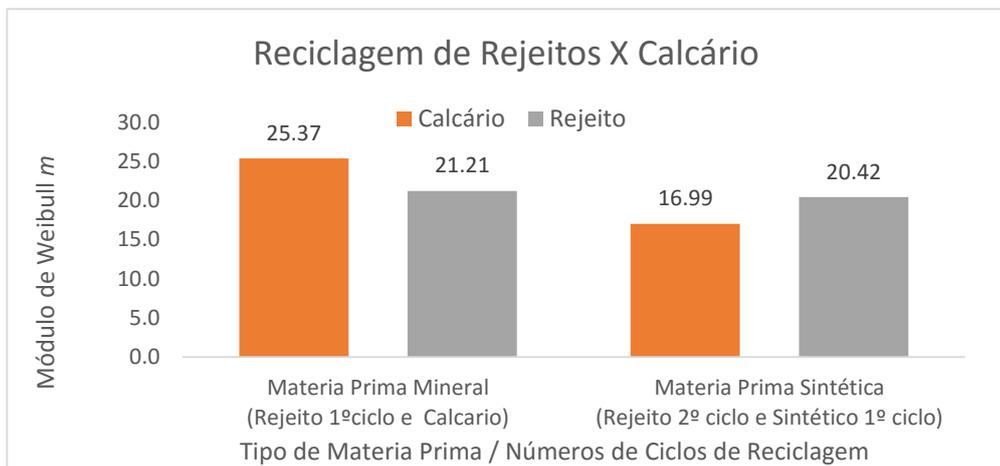


Figura 5. 19 - Dispersão do resultados do Módulo de Weibull  $m$ , com a variação da matéria prima.

Já o Módulo de Elasticidade apresenta uma variação similar ente os ciclos analisados, passando de Matéria Prima Mineral Para Matéria Prima Sintética. Os valores entre 13,10 GPa e 14,05GPa caracterizam o Módulo de Elasticidade da Matéria Prima Mineral, enquanto o valor de  $\approx 6,5$  GPa caracteriza a Matéria Prima Sintética como mostra a Figura (5.20).

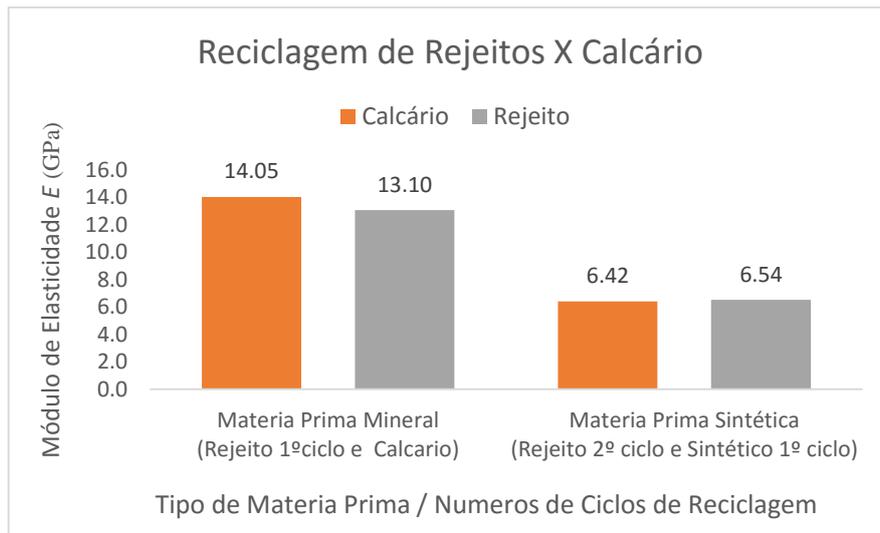


Figura 5. 20 - Variação do Módulo de elasticidade entre CPs produzidos a partir de Matéria Prima Mineral (Grupos 25 e 26) e Matéria Prima Sintética (Grupos 27 e 32)

Pode-se afirmar que quanto ao Valor do Módulo de Elasticidade em relação a matéria prima, tanto Rejeito como Calcário têm comportamento similares quando da passagem de Matéria Prima Mineral para Matéria Prima Sintética.

Avaliando o Coeficiente de Variação  $C.V.$  do  $E$ , observa-se na Figura (5.21) que apesar estabilidade do Módulo de Weibull, em reação à Resistência Intrínseca, para os CPs provindos de Rejeito, o  $C.V.$  do  $E$ , apresenta maior variação, passando de 8,25% para 13,57%, enquanto que os CPs provindos de Calcário, passa de 6,68% para 6,35%, indicando assim uma menor dispersão do Módulo de Elasticidade, tanto para Matéria Prima Mineral como para Matéria Prima Sintética.

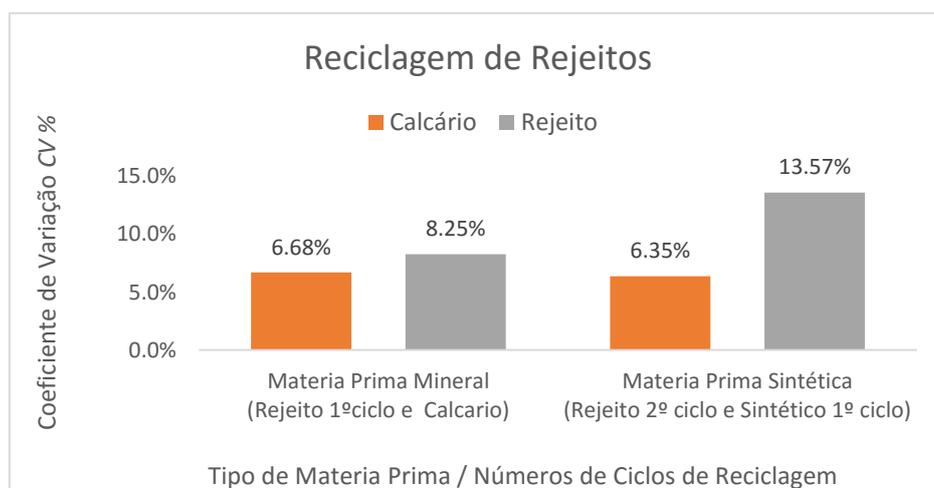


Figura 5. 21 - Avaliação do C.V. do nos CPs provindos de , Calcário (Grupos 25 e 27) e Rejeito (Grupos 26 e 32).

De um modo geral o Melhor desempenho das Matérias Primas Mineral e Sintética, provindas do Calcário, no que diz respeito ao módulo de Elasticidade em função da menor dispersão dos resultados, contrapõe igual avaliação em desfavor dos mesmos Grupos em relação à Resistência Intrínseca, Calcário (Grupos 25 e 27) e Rejeito (Grupos 26 e 32).

#### **5.4 - QUANTO ÀS ANÁLISES MACROGRÁFICAS E MICROGRÁFICAS**

Avaliando os Grupos quanto aos registros Macrográficos e Micrográficos, buscou-se observar alguma padronização que se alterava ente os grupos analisados e às diversas variações de padronização dos ensaios, quanto aos Suportes, quanto à existência de Desbaste ou não, quanto ao número de ciclos, quanto ao incremento gradual de reciclados e finalmente quanto à origem da matéria prima, carga mineral. Duas situações, de maior relevância são destacadas neste estudo, (i) A primeira, de nível Macrográfico, na forma da fratura dos CPs, (ii) a Segunda de nível Micrográfico, em relação à interface matriz polimérica x partícula de carga.

##### **5.4.1 - Análise Macrográfica da Fratura dos CPs.**

As fraturas diagonais não muito frequentes, ocorrem em quase todos os grupos e normalmente relacionadas à diferenças de espessura dos CPs, mas não necessariamente, como observa-se na Figura (5.22). Já a ruptura transversal, mas, fora da linha central de atuação da força, estava quase sempre relacionadas à vazios ocasionados pelo processo produtivo (Bolhas), mas também nem sempre, conforme Figura (5.23), bem com algumas fraturas que iniciavam-se em uma direção transversal ao longitudinal do CP, e mudavam a direção aleatoriamente em direção diagonal, conforme Figura (5.24). Como não houve uma padronização destas rupturas, nem uma ocorrência sistemática, foram consideradas como falhas aleatórias em detrimento do processo de fabricação, tanto por falhas geométricas (diferenças de espessura), como por presença de vazios (bolhas). As Figuras (5.25 e 5.26), mostram as ocorrências na linha central do plano de atuação da força, que representam a maioria das fraturas.



Figura 5. 22 - Exemplo de ensaios Em suportes Fixos e Articulado que a fratura ocorreu no diagonal ao plano de atuação da força.

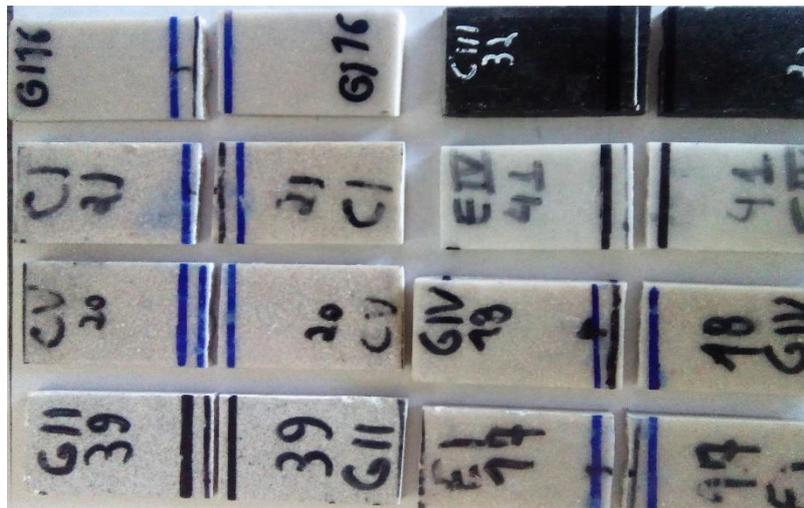


Figura 5. 23 - Exemplo de ensaios Em suportes Fixos e Articulado que a fratura ocorreram no paralelo ao plano de atuação da força.



Figura 5. 24 - Exemplo de ensaios Em suportes Fixos e Articulado que a fraturas ocorreram de forma aleatória fora do centro de atuação da força.



Figura 5. 25 - Exemplo de ensaios Em suportes Fixos e Articulado que a fratura ocorreram no centro de atuação da força (1).



Figura 5. 26 - Exemplo de ensaios Em suportes Fixos e Articulado que a fratura ocorreram no centro de atuação da força (2).

Porem três grupos tiveram uma caracterização quase integral de formas específicas de fratura, que acredita-se ser características de composição destes grupos, essas fraturas que variaram de formato dos demais, são eles Grupo 43 (reciclado sintético de 2ºciclo), Grupo 44 (reciclado sintético 4ºciclo) e Grupo ara (com 100% de resina poliéster). As caracterização destes Grupos são apresentadas nas Figuras (4.44, 4.47, 4.48), respectivamente, O grupo 44 e Grupo ara tiveram na totalidade fraturas catastróficas para o CPs, partindo-se em vários pedaços e em várias posições, totalmente diferentes dos demais, o que indica claramente a predominância de polímeros na composição do CPs , conforme Figura (5.13), a partir do grupo 43 2ºciclo, que por sua vez, teve a situação mais estável quanto a fratura de todos os grupos, com todos os CPs na região transversal e na linha central, ou paralela ao plano de atuação da força., conforme Figura (4.44). Já o Grupo 42 (3º ciclo), que teve fraturas intermediárias, com características comuns aos grupos 43 e 44, Figura (4.49). Essas fraturas, catastróficas, estão muito provavelmente ligadas ao teor de Resina, que a partir do 3ºciclo se torna passível de ocorrência destas fraturas.

#### 5.4.2 - Aspectos Micrográficos.

Ao analisar as micrografias realizadas, pode-se destacar dois aspectos qualitativos sobre a microestrutura dos materiais analisados, (i) o descolamento das partículas de carga de forma geral, da matriz polimérica, Figura (5.27), (ii) e presença de partículas nos rejeitos que não perdem a aderência, Figura (5.28).

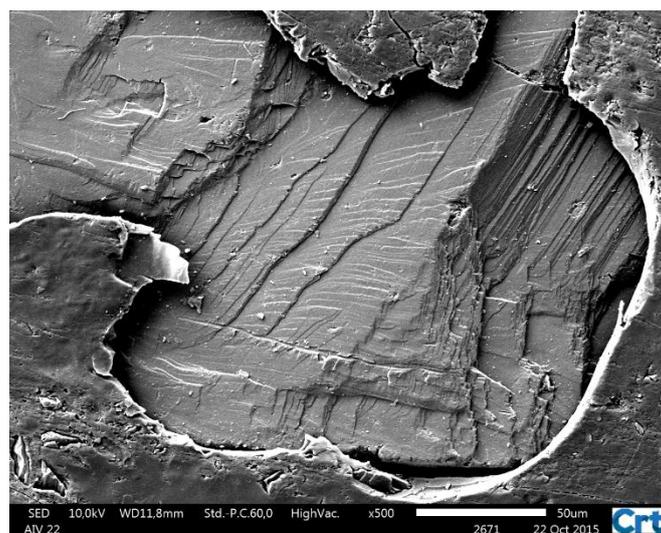


Figura 5. 27 - Micrografia ilustrando descolamento de partícula mineral da matriz polimérica.

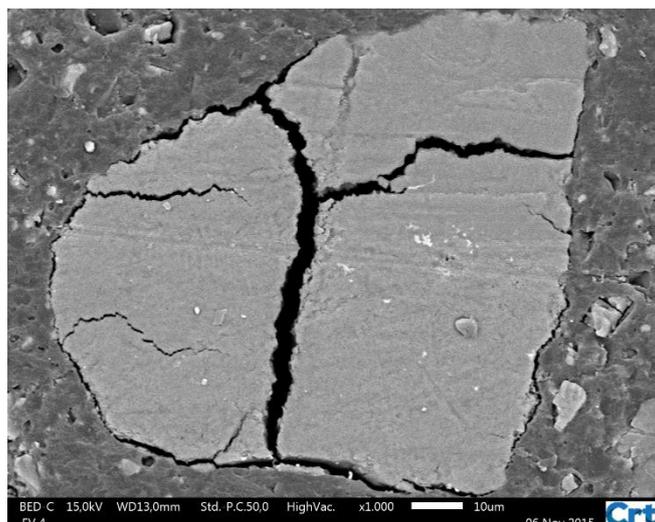


Figura 5. 28 - Micrografia em amostra de rejeito mantendo boa parte da aderência com a contração da matriz polimérica.

O polímero utilizado neste experimento tem características de contração, segundo o fabricante, em torno de 1% a 2 %, ao contrair o polímero tende a ampliar os espaço que envolvem as partículas presentes na matriz poliméricas, conforme mostra a Figura 5.27, porem algumas partículas encontradas somente nos rejeitos de marmorarias demonstraram através da Figura 5.28, uma melhor iteração interfacial com a matriz polimérica, chegando ao ponto de sofrer fissuras internas, provavelmente por tração sofrida pela ação da contração do material polimérico, e não perder a aderência total com a cavidade expandida.

Não foi possível através das análises realizadas identificar qual o tipo de mineral responsável por essa aderência, mas vale ressaltar que essa ocorrência só possível ser observada em amostras de Rejeito.

## 5.5 - ANALISE DOS RESULTADOS OBTIDOS POR ELEMENTOS FINITOS.

A partir dos resultados obtidos por **Simulação Numérica (SN)**, conforme Tabelas (4.17 e 4.18), foi realizada a análise comparativa com os valores de médios do Módulo de Elasticidade ( $E$ ), da Tensão de Ruptura ( $\sigma$ ) e seus respectivos Coeficientes de Variação ( $C.V.$ ), produzindo as Tabelas (5.3 a 5.10), e Figura (29 a 36), que possibilitam a análise comparativa entre os valores obtido por Método Analítico (MA), equações (2.3 e 2.4, respectivamente) e por Simulação Numérica, conforme descrito no item (3.3.3), Utilizando SA e SF.

Tabela 5. 3- Módulo de Elasticidade ( $E$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SA

Propriedades / Grupo - Composição	Mod. Elasticidade Média $E$ (Gpa)		$\frac{((E)_{MA}-(E)_{SN})}{(E)_{MA}} \cdot 100$ (%)
	M. Analítico	S. Numérica	
25- Calcário 100%	14,05	14,46	-2,91%
16 - 90% Calc. + 10% Sint.	13,55	14,43	-6,50%
17 - 80% Calc. + 20% Sint.	12,13	12,59	-3,79%
18 - 70% Calc. + 30% Sint.	10,54	11,41	-8,22%
19 - 60% Calc. + 40% Sint.	10,85	11,30	-4,19%
20 - 50% Calc. + 50% Sint.	10,30	10,59	-2,82%
21 - 40% Calc. + 60% Sint.	9,81	10,27	-4,72%
22 - 30% Calc. + 70% Sint.	8,57	9,07	-5,88%
23 - 20% Calc. + 80% Sint.	7,85	8,04	-2,41%
24 - 10% Calc. + 90% Sint.	6,78	7,43	-9,45%
27-Sintetico 100%	6,42	6,65	-3,52%
26- Rejeito 100%	13,10	14,16	-8,11%
Média das diferenças =			<b>-5,21%</b>

O Módulo de Elasticidade ( $E$ ) previsto pela solução analítica (ver equação (2.4), utilizando a metodologia do retângulo médio) foi sempre inferior ao previsto numericamente pelo ANSYS. Como o momento de inércia ( $I$ ) de área dos CPs depende da espessura dos mesmos elevada ao cubo ( $t^3$ ) e esta varia, longitudinal e transversalmente, o fato da solução analítica se basear em um valor aproximado e constante de  $I$ , e a simulação via elementos finitos representar melhor as variações contínuas reais de espessura, principalmente na região de momento fletor máximo, contribuiu com esta tendência.

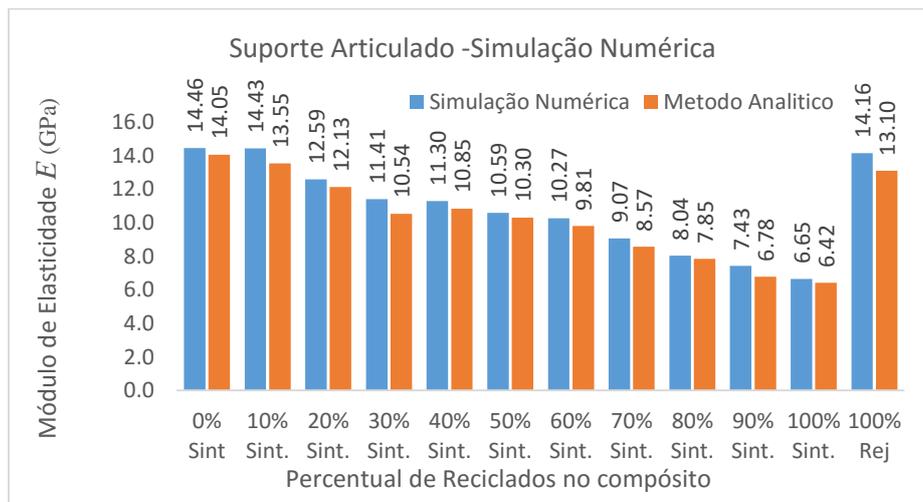


Figura 5. 29 - Módulo de Elasticidade ( $E$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SA

Tabela 5. 4 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Módulo de Elasticidade (E) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SA

Propriedades / Grupo - Composição	Coeficiente de Variação do E C.V. (%)		$((C.V)_{MA} - (C.V)_{SN})$ (%)
	M. Analítico	S. Numérica	
25- Calcário 100%	6,7%	6,2%	0,5%
16 - 90% Calc. + 10% Sint.	8,5%	6,4%	2,1%
17 - 80% Calc. + 20% Sint.	5,4%	4,1%	1,3%
18 - 70% Calc. + 30% Sint.	8,0%	6,5%	1,5%
19 - 60% Calc. + 40% Sint.	6,9%	5,4%	1,5%
20 - 50% Calc. + 50% Sint.	5,2%	5,0%	0,2%
21 - 40% Calc. + 60% Sint.	6,0%	6,0%	0,0%
22 - 30% Calc. + 70% Sint.	5,4%	2,9%	2,5%
23 - 20% Calc. + 80% Sint.	10,8%	10,1%	0,7%
24 - 10% Calc. + 90% Sint.	9,6%	6,8%	2,8%
27-Sintetico 100%	6,4%	6,3%	0,1%
26- Rejeito 100%	8,2%	7,3%	0,9%
Média das diferenças =			<b>1,2%</b>

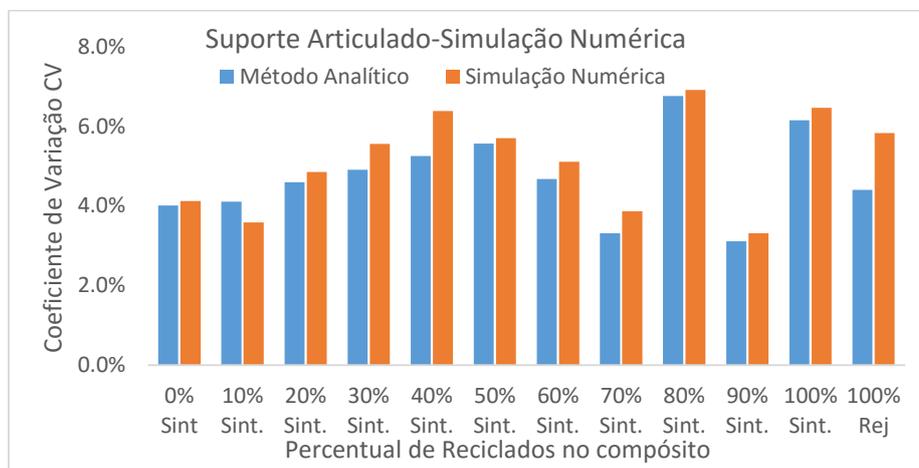


Figura 5. 30 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Módulo de Elasticidade (E) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SA

Observando a variação do Módulo de Elasticidade (E), entre os dois métodos de obtenção de dados, Método Analítico e Simulação Numérica, com diferença média de 5,21%, variando entre 2,4% e 9,5%, Figura (5.27), sendo sempre maior pela Simulação Numérica, contata-se uma aproximação em suas tendências ao acréscimo de reciclados, quando utilizado o SA.

Já o Coeficiente de Variação ( $C.V$ ), tem uma Variação percentual média em torno de 1,17% variando de 0% a 2,8%. As variações também ocorrem sempre maior na Simulação Numérica.

Tabela 5. 5 - Módulo de Elasticidade ( $E$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF

Propriedades / Grupo - Composição	Mod.Elasticidade Média E (Gpa)		$\frac{((E)_{MA}-(E)_{SN})}{(E)_{MA}} \cdot 100$ (%)
	M.Analítico	S. Numérica	
25- Calcario 100%	12,88	13,26	-3,0%
16 - 90%Calc. + 10%Sint.	11,17	11,21	-0,3%
17 - 80%Calc. + 20%Sint.	10,69	11,32	-5,9%
18 - 70%Calc. + 30%Sint.			
19 - 60%Calc. + 40%Sint.			
20 - 50%Calc. + 50%Sint.	9,95	10,35	-4,0%
21 - 40%Calc. + 60%Sint.	8,60	9,02	-4,9%
22 - 30%Calc. + 70%Sint.	8,16	8,78	-7,6%
23 - 20%Calc. + 80%Sint.			
24 - 10%Calc. + 90%Sint.	6,72	7,00	-4,1%
27-Sintetico 100%			
26- Rejeito 100%	12,45	13,28	-6,6%
	Média das diferenças =		-4,5%

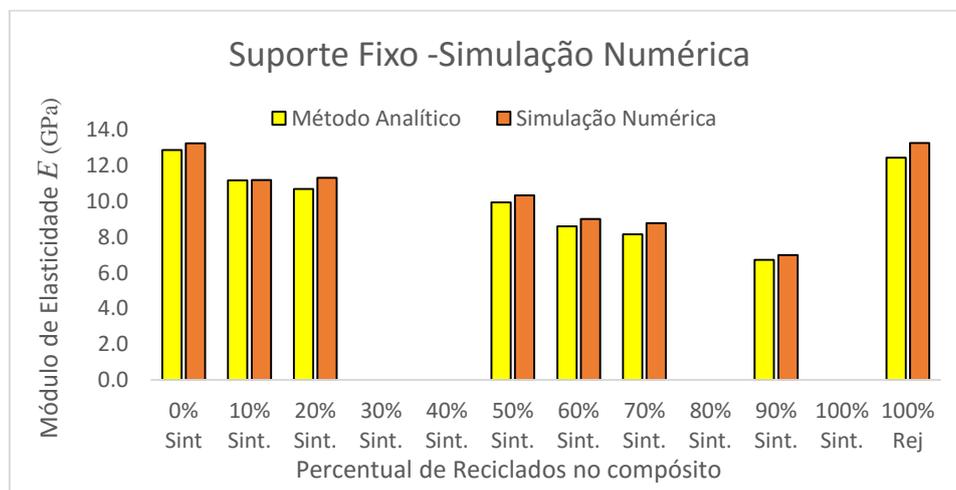


Figura 5. 31 - Módulo de Elasticidade ( $E$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF

Como foi observado no SA, a Simulação Numérica no SF, também apresentou resultados sistematicamente maiores do Módulo de Elasticidade ( $E$ ), em relação ao método analítico, 4,5%, variando entre 0,3% e 7,6%.

Tabela 5. 6 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Módulo de Elasticidade (E) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF

Propriedades / Grupo - Composição	Coeficiente de Variação do E, C.V. (%)		$((C.V.)_{MA} - (C.V.)_{SN})$ (%)
	M. Analítico	S. Numérica	
25- Calcario 100%	7,2%	5,9%	1,2%
16 - 90%Calc. + 10%Sint.	13,7%	14%	-0,3%
17 - 80%Calc. + 20%Sint.	13,5%	12,1%	1,4%
18 - 70%Calc. + 30%Sint.			
19 - 60%Calc. + 40%Sint.			
20 - 50%Calc. + 50%Sint.	7,9%	7,2%	0,7%
21 - 40%Calc. + 60%Sint.	7,9%	9,3%	-1,4%
22 - 30%Calc. + 70%Sint.	6,1%	5,2%	0,9%
23 - 20%Calc. + 80%Sint.			
24 - 10%Calc. + 90%Sint.	10,6%	5,7%	4,8%
27-Sintetico 100%			
26- Rejeito 100%	10,6%	8,3%	2,3%
	Média das diferenças =		1,2%

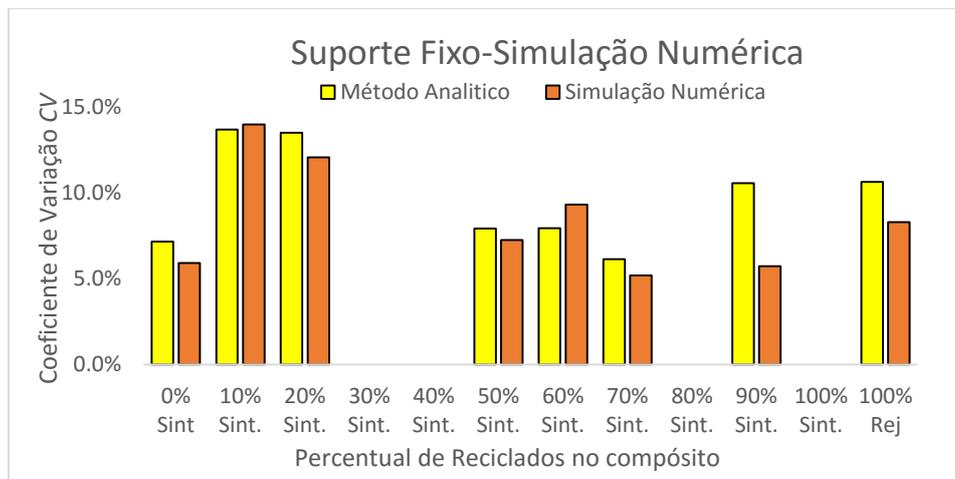


Figura 5. 32 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Módulo de Elasticidade (E) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF

O coeficiente de Variação (C.V.) do E, analisado por Simulação Numérica, teve diferenças entre -1,4% e 4,8%, e média de 1,2%, a mesma do SA.

Tabela 5. 7 - Tensão Ruptura ( $\sigma$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SA

Propriedades / Grupo - Composição	Tensão Ruptura Média $\sigma$ (MPa)		$\frac{((\sigma)_{MA} - (\sigma)_{SN}) \cdot 100}{(\sigma)_{MA}}$ (%)
	M.Analítico	S. Numérica	
<b>25- Calcario 100%</b>	28,97	<b>29,25</b>	-1,0%
<b>16 - 90%Calc. + 10%Sint.</b>	28,85	<b>29,37</b>	-1,8%
<b>17 - 80%Calc. + 20%Sint.</b>	29,94	<b>30,77</b>	-2,8%
<b>18 - 70%Calc. + 30%Sint.</b>	29,12	<b>30,58</b>	-5,0%
<b>19 - 60%Calc. + 40%Sint.</b>	30,57	<b>30,85</b>	-0,9%
<b>20 - 50%Calc. + 50%Sint.</b>	30,21	<b>30,55</b>	-1,1%
<b>21 - 40%Calc. + 60%Sint.</b>	31,06	<b>31,89</b>	-2,7%
<b>22 - 30%Calc. + 70%Sint.</b>	31,01	<b>31,88</b>	-2,8%
<b>23 - 20%Calc. + 80%Sint.</b>	30,52	<b>31,11</b>	-1,9%
<b>24 - 10%Calc. + 90%Sint.</b>	31,51	<b>31,75</b>	-0,8%
<b>27-Sintetico 100%</b>	32,17	<b>31,63</b>	1,7%
<b>26- Rejeito 100%</b>	32,72	<b>33,34</b>	-1,9%
Média das diferenças =			<b>-1,7%</b>

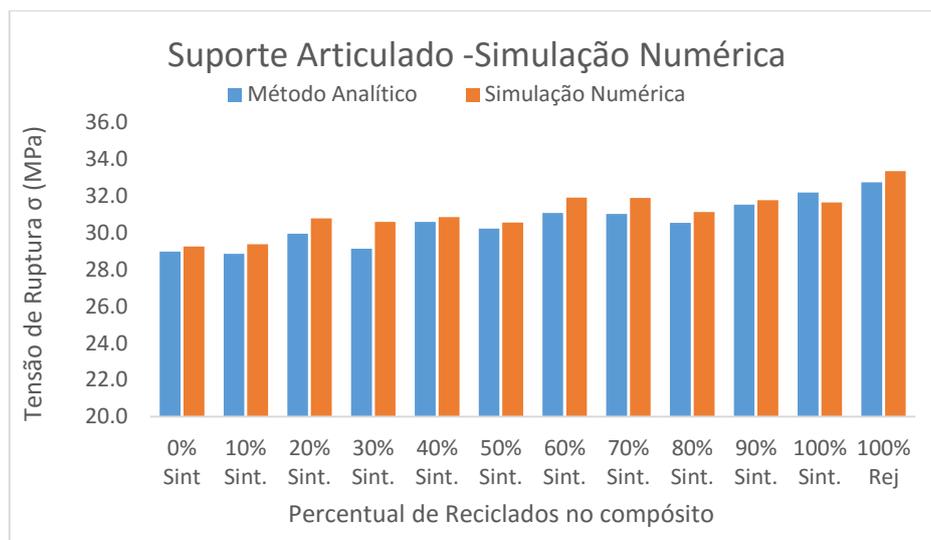


Figura 5. 33 - Tensão Ruptura ( $\sigma$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SA

A Tensão de Ruptura Média ( $\sigma$ ), pelo método analítico, é obtida a partir da média das Tensões de Ruptura ( $\sigma$ ) de cada CP, utilizando a equação (2.3). Diferenças entre 1,7% e -5,0%, sendo que a diferença média é de -1,7%, mantendo a mesma tendência de valores encontrados, maiores na simulação Numérica, como ocorreu para os cálculos do Módulo de Elasticidade, tanto para o SF com SA.

Tabela 5. 8 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Módulo de Elasticidade Médio (Em) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SA

Propriedades / Grupo - Composição	Coeficiente de Variação da $\sigma$ , C.V. (%)		$((C.V)_{MA} - (C.V)_{SN})$ (%)
	M. Analítico	S. Numérica	
<b>25- Calcário 100%</b>	4,0%	<b>4,1%</b>	-0,1%
<b>16 - 90%Calc. + 10%Sint.</b>	4,1%	<b>3,6%</b>	0,5%
<b>17 - 80%Calc. + 20%Sint.</b>	4,6%	<b>4,8%</b>	-0,3%
<b>18 - 70%Calc. + 30%Sint.</b>	4,9%	<b>5,6%</b>	-0,6%
<b>19 - 60%Calc. + 40%Sint.</b>	5,3%	<b>6,4%</b>	-1,1%
<b>20 - 50%Calc. + 50%Sint.</b>	5,6%	<b>5,7%</b>	-0,1%
<b>21 - 40%Calc. + 60%Sint.</b>	4,7%	<b>5,1%</b>	-0,4%
<b>22 - 30%Calc. + 70%Sint.</b>	3,3%	<b>3,9%</b>	-0,6%
<b>23 - 20%Calc. + 80%Sint.</b>	6,8%	<b>6,9%</b>	-0,1%
<b>24 - 10%Calc. + 90%Sint.</b>	3,1%	<b>3,3%</b>	-0,2%
<b>27-Sintetico 100%</b>	6,2%	<b>6,5%</b>	-0,3%
<b>26- Rejeito 100%</b>	4,4%	<b>5,8%</b>	-1,4%
	Média da diferenças =		<b>-0,4%</b>

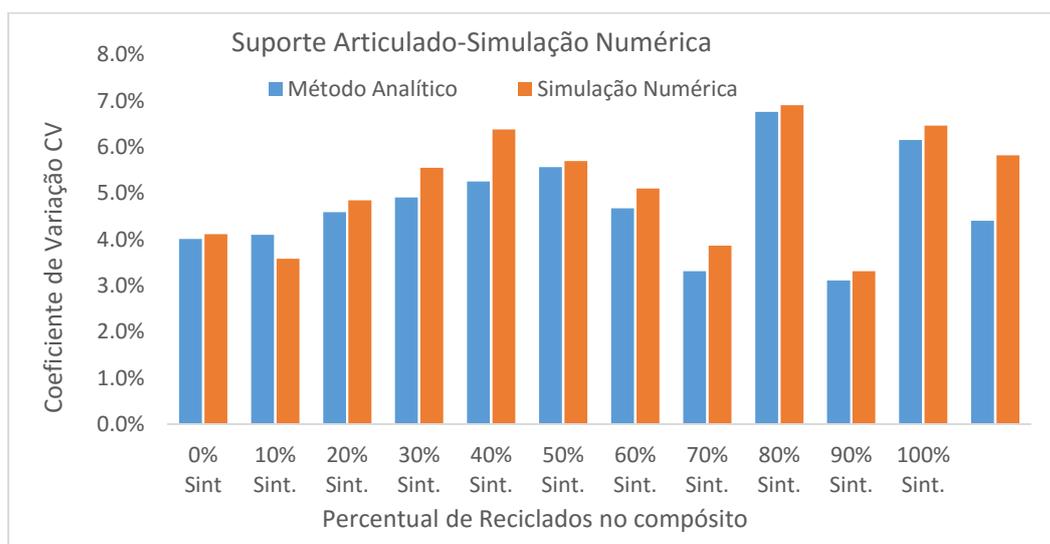


Figura 5. 34 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Módulo de Elasticidade Médio (E) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SA

Já o Coeficiente de Variação (C.V.) da Tensão de Ruptura  $\sigma$ , teve diferenças em média de 0,4%, sendo a melhor aproximação de todas as propriedades e características avaliadas entre os métodos Analítico e de Simulação Numérica, onde as diferenças variaram de -1,4 a 0,5.

Tabela 5. 9 - Tensão Ruptura ( $\sigma$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF

Propriedades / Grupo - Composição	Tensão Ruptura Média $\sigma$ (MPa)		$\frac{((\sigma)_{MA} - (\sigma)_{SN}) \cdot 100}{(\sigma)_{MA}}$ (%)
	M. Analítico	S. Numérica	
25- Calcário 100%	27,38	27,62	-0,9%
16 - 90% Calc. + 10% Sint.	28,20	28,70	-1,8%
17 - 80% Calc. + 20% Sint.	29,13	29,59	-1,6%
18 - 70% Calc. + 30% Sint.	-	-	
19 - 60% Calc. + 40% Sint.	-	-	
20 - 50% Calc. + 50% Sint.	30,43	30,99	-1,8%
21 - 40% Calc. + 60% Sint.	30,69	31,12	-1,4%
22 - 30% Calc. + 70% Sint.	30,86	31,70	-2,7%
23 - 20% Calc. + 80% Sint.	-	-	
24 - 10% Calc. + 90% Sint.	30,67	31,55	-2,9%
27-Sintetico 100%	-	-	
26- Rejeito 100%	31,77	32,63	-2,7%
	Média da diferenças =		<b>-2,0%</b>

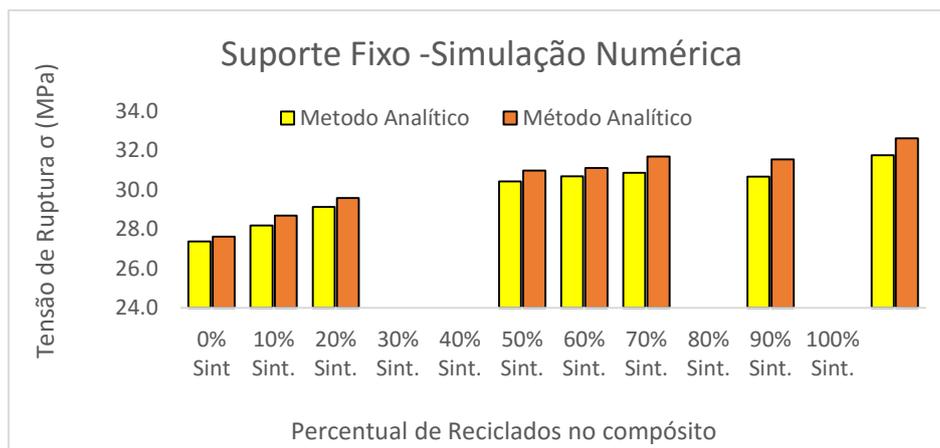


Figura 5.35 - Tensão Ruptura ( $\sigma$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF

Avaliando os resultados da Tensão Ruptura ( $\sigma$ ), calculados para o Suporte Fixo (SF) e suas diferenças com as Simulações Numéricas, observa-se valores maiores em 2,0 % em média, variando de -0,9% a 2,9%. Nesta avaliação, em conjunto com a observância dos resultados da  $\sigma$ , percebe-se uma aproximação significativa de 1,7% e 2,0% em média de diferenças de cálculo entre os dois métodos, SA e SF, respectivamente, mesmo com suportes diferentes. Ressaltando sempre a diferença positiva pelo método Numérico.

Tabela 5. 10 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Tensão de Ruptura ( $\sigma$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF

Propriedades / Grupo - Composição	Coeficiente de Variação do $\sigma$ C.V. (%)		$((C.V)_{MA} - (C.V)_{SN})$ (%)
	M.Analítico	S. Numérica	
25- Calcário 100%	4,1%	4,0%	0,2%
16 - 90% Calc. + 10% Sint.	6,3%	8,3%	-2,0%
17 - 80% Calc. + 20% Sint.	6,1%	6,7%	-0,6%
18 - 70% Calc. + 30% Sint.	-		
19 - 60% Calc. + 40% Sint.	-		
20 - 50% Calc. + 50% Sint.	7,1%	7,0%	0,1%
21 - 40% Calc. + 60% Sint.	4,8%	5,5%	-0,7%
22 - 30% Calc. + 70% Sint.	3,7%	6,9%	-3,2%
23 - 20% Calc. + 80% Sint.	-		
24 - 10% Calc. + 90% Sint.	4,2%	6,3%	-2,1%
27-Sintético 100%	-		
26- Rejeito 100%	7,1%	6,7%	0,4%
Média da diferenças =			<b>-1,0%</b>

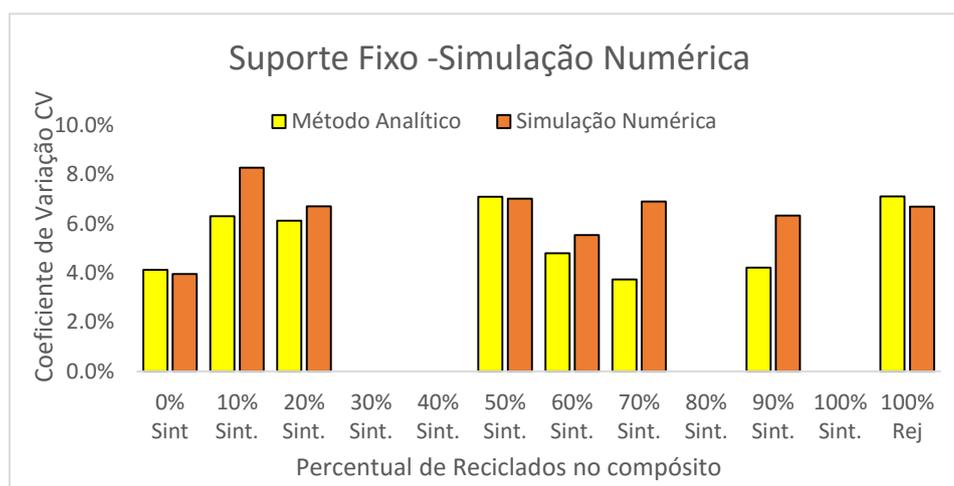


Figura 5. 36 - Coeficiente de Variação (C.V.) do Tensão de Ruptura ( $\sigma$ ) pelo Método Analítico e por Simulação Numérica em SF

As diferenças entre a Simulação Numérica e o Método Analítico, apresentaram um Coeficiente de Variação (C.V.) para Tensão de Ruptura  $\sigma$ , de 1,0% em média variando de -2,0% a 0,4%. Essas diferenças de C.V. tanto para SA como SF, demonstram uma boa aproximação dos cálculos realizados para obtenção das Tensões de Ruptura obtidas neste trabalho, levando-se em consideração as imperfeições geométricas dos CPs analisados e as variações de análise, SF e SA. Vale ainda ressaltar que o material analisado possui características frágeis nas rupturas, e que como mostrado no item (5.1), as fraturas nem sempre aconteceram nos planos considerados para cálculo, em  $L/2$ , gerando assim variações naturais de análise onde C.V. de todos os grupos avaliados em média foi de

9,1% no Módulo de Elasticidade  $E$  e na Tensão de Ruptura  $\sigma$  de 5,3%. Sendo assim as variações observadas para uma análise geral, empregando-se qualquer um dos métodos, é possível a obtenção de resultados que indiquem as tendências para as avaliações e variações, propostas neste trabalho.

Já em relação à Simulação Numérica no que diz respeito aos resultados, observou-se uma variação sempre positiva nos cálculos de Tensão de Ruptura e Módulo de Elasticidade.

### 5.6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS PELO INDECE ( $m*CV$ )

Das Tabelas 4.4 e 4.8 avaliou-se os índices correspondente ao produto ( $m*CV$ ), equação (3.27), resumindo nas Tabelas (5.11 e 5.12 ) e nos Gráfico das Figuras (5.36 e 5.37), para melhor observação.

Tabela 5. 11 - Índice de correspondência entre Coeficiente de Variação  $C.V.$  e modulo de Weibull ( $m$ ), entre SA e SF em relação ao acréscimo de reciclados.

Suporte / grupo	Índice ( $m*CV$ ) SA + SF	Índice ( $m*CV$ ) SA	Índice ( $m*CV$ ) SF
Grupo 25	1,09	1,02	0,96
Grupo 16	1,08	0,99	1,00
Grupo 17	1,04	1,03	0,94
Grupo 18	0,96	0,96	
Grupo 19	1,06	1,06	
Grupo 20	1,01	1,01	0,97
Grupo 21	1,10	0,99	1,02
Grupo 22	1,05	0,96	0,95
Grupo 23	1,06	1,06	
Grupo 24	1,07	0,92	1,02
Grupo 27	1,05	1,05	
Grupo 26	0,99	0,93	0,95
Média	<b>1,05</b>	<b>1,00</b>	<b>0,98</b>
Desv.P	0,04	0,04	0,03
C.V.	<b>3,7%</b>	<b>4,5%</b>	<b>3,1%</b>

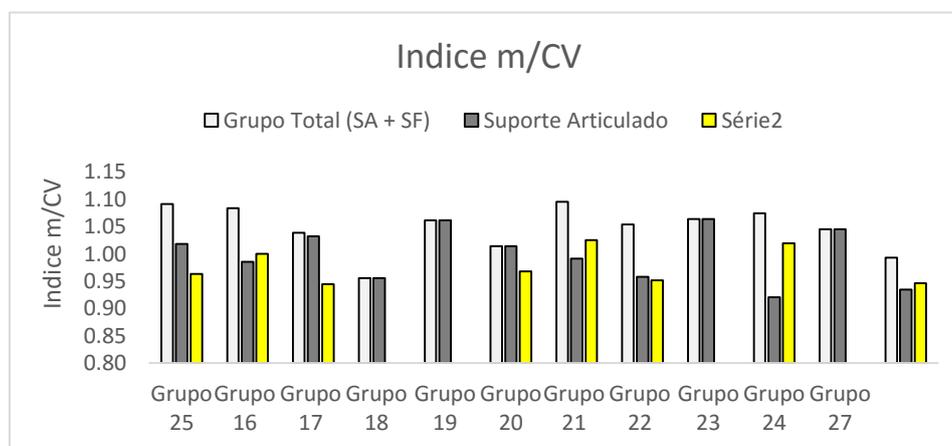


Figura 5. 37 - Variação do Índice de correspondência de ( $m*CV$ ), em SF e SA.

Na média o Índice de correspondência de  $(m*CV)$ , ficou em 1,00 no SA e 0,98 no SF, mostrando um índice ligeiramente maior na média dos grupos totais de 1,05, indicando a existência de variação maior entre os suportes do que entre a variação de composição para adição de reciclados.

Já a avaliação em relação aos índices observados pela Tabela (5.12) e gráfico da Figura (5.37), relativo aos grupos com e sem desgaste, os grupos que sofreram desgaste se distanciaram de forma contundente em aproximadamente 12% em média, dos que não foram desgastados sendo o índice de 1,06 para CPs sem desgaste, e 0,92 para os com desgaste.

Com essas avaliações e levando em consideração que, os grupos que sofreram as maiores distorções em comparação aos CPs que foram ensaiados Sem Desbastes e em Suporte Articulado (Grupos com maior Weibull e menor C.V. de forma Geral), pode se afirmar que a composição, dos materiais estudados neste trabalho interferem menos no índice do que as distorções de geometria dos CPs nos ensaios quanto aos suportes e em relação a retirada da camada superficial inferior.

Tabela 5. 12 - Variação do Índice de correspondência entre  $m$  e  $C.V.$

Suporte / grupo	$(m*CV)$ Grupos Totais	$(m*CV)$ Sem desbaste	$(m*CV)$ Com desbaste
Gr.41 Calcário	1,10	1,10	
Gr.39 1ºciclo	1,11	1,11	
Gr.43 2ºciclo	1,09	0,96	0,99
Gr.42 3ºciclo	1,02	1,11	0,90
Gr.44 4ºciclo	1,05	1,01	0,86
Média	<b>1,07</b>	<b>1,06</b>	<b>0,92</b>
Desv P	<b>0,03</b>	<b>0,06</b>	<b>0,05</b>
C.V.	<b>3,0%</b>	<b>5,7%</b>	<b>5,9%</b>

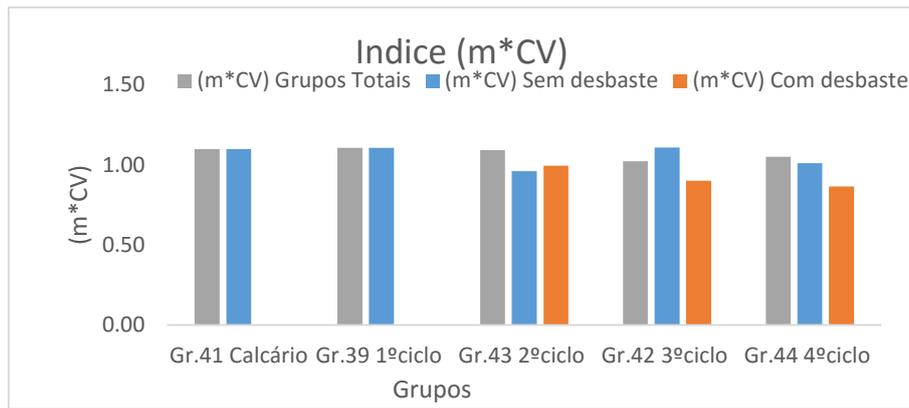


Figura 5. 38 - Variação do Índice de correspondência de ( $m*CV$ ), em Sem Desbaste e Com Desbaste.

Avaliando todos os Grupo em conjunto em conjunto (16 grupos), que foram ensaiados com SA e Sem desbaste, encontra-se o índice de 1,03, ou seja, o Módulo de Weibull  $m \approx 1,03/C.V.$ , onde C.V é calculado a partir da Tensão de Ruptura ( $\sigma_r$ ) de cada CP, Ou ainda, levando-se em consideração que os grupos de 16 a 27 utilizaram 20% e ensaiados em SA, tiveram índice médio de 1,00, e os grupos de 39 a 44 foram produzidos com 25% de resina o índice foi de 1,06.

## 6 - CONCLUSÕES

Ao se levantar hipóteses sobre as possibilidades de criar um novo tipo de Mármore Sintético, incorporando diferentes teores de material reciclado, e ainda avaliar esse novo material sobre o aspecto de reciclagens de múltiplos ciclos, este estudo se propôs avaliar o desempenho de propriedades mecânicas, bem como características quantitativas e qualitativas desses materiais que pudessem subsidiar o desempenho desse novo material em novas formulações da pedra sintética, utilizando matéria prima reciclada.

Um dos índices de desempenho foi quantificado através da Resistência Intrínseca dos novos materiais,  $\sigma_0$ , em diversas formulações nas quais a carga incorporada na matriz variou de 0% a 100% de reciclados. Neste caso, referente ao primeiro ciclo de reciclagem, foi constatado um aumento de 8% em  $\sigma_0$ , ao atingir-se 100% de reciclados. Adicionalmente, como comprovação desta tendência, o aumento até o 4º ciclo de reciclagem foi em média de 7,5% a cada ciclo, apresentando uma melhora total de 32% em relação ao mármore sintético convencional, fabricado a partir o calcário puro. Portanto, o aumento em  $\sigma_0$ , com as novas formulações investigadas foi significativo.

Já em relação ao Módulo de Elasticidade, E, tanto na incorporação progressiva de reciclados no primeiro ciclo, bem como nos ciclos posteriores (até o 4º), houve uma queda expressiva nessa propriedade. Já no primeiro ciclo, a diminuição foi de 50%, de E = 11,37 GPa para E = 5,39 GPa. E, em torno de 30% em ciclos subsequentes, alcançando um patamar inferior ao da própria resina pura (a matriz), ao final do 4º ciclo (E = 1,67 GPa sendo o da resina poliéster E = 3,15 GPa. No 2º ciclo de reciclagem, Grupo 43 (E  $\approx$  3,15 GPa), o valor é praticamente idêntico ao do patamar resina pura. Isso era esperado, uma vez que no 2º ciclo, o percentual de polímero chega próximo a 60%. Sendo que no 4º ciclo, o máximo ensaiado, o percentual de resina é próximo de 80%. Assim, no que concerne à rigidez dos novos materiais investigados, deve-se ter cautela com as reciclagens após o 3º, pois o módulo de elasticidade passa a ficar inferior ao da resina pura. Entretanto, como a resina é o material menos denso dentre os constituintes do mármore sintético, e o seu percentual aumenta com as reciclagens, pode-se compensar facilmente a diminuição do módulo elástico com o aumento do momento de inércia dos produtos, que aumenta com o cubo da espessura.

A reciclagem de múltiplos ciclos é na prática, algo que certamente, não ocorrerá de forma integral consecutivamente, e sim possibilidade futuro quando sua realização estiver consolidada. O presente estudo teve por objetivo conhecer o comportamento mecânico das principais propriedades, para que as ações possam ser realizadas com o maior acerto possível em reaproveitamentos parciais. Mas se preciso, também dará subsídio para reciclagens totais e consecutivas. A reciclagem do mármore sintético é viável e benéfica não só à resistência mecânica, mas também à leveza dos produtos, ao menor custo da matéria prima, e ao meio ambiente.

Um aspecto importante do Trabalho foi a qualificação dos rejeitos de Marmorarias, como matéria prima de melhores qualidades que o calcário extraído da natureza com finalidade específica como carga mineral. Na primeira utilização do rejeito, sua resistência intrínseca, foi 13,7% maior que a do calcário utilizado pela primeira vez como matéria prima Mineral. Nas demais propriedades seus comportamentos são similares (rejeitos e calcário). Qualificando positivamente a utilização de Rejeitos de marmorarias como matéria Prima para produção no que concerne às propriedades e características analisadas neste trabalho.

Propor um trabalho utilizando CPs que representassem o produto Mármore Sintético, com a melhor fidelidade possível, buscando reproduzir todo processo convencional de fabricação, foi sem dúvida um imenso desafio, pois as condições de ensaio dos CPs eram adversas a se conseguir uma padronização geométrica dos CPs. Foi então necessário buscar soluções através das ferramentas de análise das propriedades mecânicas, adaptando inclusive uma proposta de variação na forma de ensaio de flexão de três pontos, não prevista pela Norma ASTM 790-10, criando assim condições para realização dos ensaios de Corpos de Prova (CPs) com superfícies inferiores irregulares, utilizando-se também suportes articulados (SA) no dispositivo de ensaio. Em CPs comparáveis, o módulo de Weibull ( $m$ ), que quantifica a repetibilidade da tensão de ruptura, aumentou de 20,6 para 24,0, em média, ao se passar a usar SA em substituição aos suportes fixos (SF). Portanto, o emprego de suportes articulados aumenta a confiabilidade dos ensaios.

Ao avaliar-se as alterações da Resistência Intrínseca  $\sigma_0$ , entre ensaios com e sem desbaste de CPs comparáveis, pode-se destacar uma perda 9,83% em média nesta propriedade. Como os desbastes nos CPs ocorreram na parte inferior dos CPs, para regularização da espessura, Há evidências portanto, de que essa camada superficial inferior dos CPs, possuem influência direta, na Resistência Intrínseca do material analisado. Reforçando

assim a necessidade de preservar o CPs sem acabamento. E isto foi possível com o uso bem sucedido do suporte articulado (SA) em alternativa aos fixos (SF). Para avaliar-se os materiais, o uso dos SA é preferível do que desbastá-los e ensaiá-los com SF.

O Índice ( $m \cdot C.V.$ ), se manteve próximo ao valor 1,00, nos grupos que utilizaram 20% de resina na formulação (Grupos 16 a 27) e 1,06 para os 25% de resina na formulação (Grupos 39 a 44), em média, considerando todos os grupos sem desbaste e ensaiados em SA. Para esses materiais em particular o cálculo do módulo de Weibull poderá ser obtido, por aproximação, de forma bem mais simplificada, utilizando a expressão  $m = 1,00/C.V.$  e  $m = 1,06/C.V.$  respectivamente (ver Tabelas 5.12 e 5.13).

Como Sugestões de trabalhos futuros, pode ser citado baseado nas experiências obtidas no desenvolvimento desta Tese, os seguintes tópicos:

- Análise da fratura frágil submetida a flexão, sob influência de esforços de torção;
- Avaliação da vibração na fabricação de pedra sintética em relação às suas propriedades e à redução de vazios;
- Influência das Granulometrias e tensões superficiais de cargas, nas propriedades da pedra sintética; e
- Avaliação sobre o reaproveitamento de polímeros termofixos;

## 7 - BIBLIOGRAFIA

- ALVES, A.F. (2000) “*Modelos e a Interpretação CAE - Método dos Elementos Finitos*”, CET- Cursos e Tutoriais via Internet, i-[cae] revista cadware, [www.cadware.com.br](http://www.cadware.com.br), acesso em 10/11/2015.
- ARA QUÍMICA S/A, Arazyn 3.7 Resina Poliéster Insaturado, Orto-Tereftálica, Média Reatividade - Boletim Técnico, Ara Química, Araçariçguama - SP, 2007
- ARAUJO, M.D., MIRANDA, R.B.P., FREDERICCI, C., YOSHIMURA, H.N., CESAR, P.F., (2015), “*Effect of fiber addition on slow crack growth of a dental porcelain*”, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, vol.44, pg.85-95
- ARGYROU, R. (2015) “*Edge chipping resistance and flexural strength of polymer infiltrated ceramic network and resin nano ceramic materials*”, Dissertation/Thesis, Marquette University, Wisconsin, United States. Isbn .9781321687293
- ASKELAND, DONALD R., PHULÉ P. P.,(2008), “*Ciência e Engenharia dos Materiais*” Tradução Vertice Translate e All Tasks. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 579p.
- ASKELAND, D.R. ,FULAY, P.P., WRIGHT W.J., (2011) “*The Science and Engineering of Materials*”, 6ª Edição, Learning, Stamford - EUA
- ASTM, D-790-10- (2010) “*Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*”, West Conshohocken, PA 19428-2959, United State, EDT 2010.
- ASTM E1187-97, “*Standard Terminology Relating to Conformity Assessment (Withdrawn 2006)*”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- BERGMAN, B. “*On the Estimation of the Weibull Modulus*”, Journal of Material Science Letters, n.3, p.689-692, 1983.
- BILGIN, N., YEPREM, H.A., ARSLAN, S., BILGIN, A., GÜNAY, E., MARSOGLU, M. (2012), “*Use of waste marble powder in brick industry*”, Construction and Building Materials, v.29 , pg 449-457, Batman University, Department of Chemistry, Batman,

Turkey.

BINICIA, H., SHAHB, T., AKSOGANC, O., KAPLAND, H.; (2007) “*Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates*” - Kahramanmaras Sutcu Imam University, Engineering and Architectural Faculty, Department of Civil Engineering, Avsar Campus, Kahramanmaras, Turkey.

BRIBIÁN, I. Z, CAPILLA, A.V., USÓN, A.A. (2010) “*Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. Building and Environment*”, CIRCE - Centre of Research for Energy Resources and Consumption, Campus Río Ebro- University of Zaragoza, Mariano Esquillor Gómez, 15 - 50018 Zaragoza, Spain

CHAMIS, C.C., (1974), “*Analysis of The Three-Point-Bend Test For Materials With Unequal Tension And Compression Properties*”, Lewis Research Center National Aeronautics and Space Administration Cleveland, Ohio 44135

COLMAN, J. M., TEODORO, P. E., NEIVOCK, M. P., RIVA, G. S., FORMAGINI, S., (2014) “*Comparação entre as distribuições normal e de weibull para análise da resistência à compressão do concreto*”, Revista Eletrônica De Engenharia Civil, Vol.9 nº3, 10-15,.

DANIEL, I. M., ISHAI, O., (2006), “*Engineering mechanics of composite materials*”, New York: Oxford University Press.

DEDAVID, B. A., GOMES, C. I., MACHADO, G., (2007), “*Microscopia Eletrônica de Varredura Microscopia Eletrônica de Varredura -Aplicações e Preparação de Amostras*”, Edição do CEMM - Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, PUC - RS, Porto Alegre.

FRISCHHOLZ, P., (2004), “*Breviary Technical Ceramics*”, *Verband der Keramischen Industrie*, I.Z.T.K. (Informations Zentrum Technische Keramik), *Fahner Verlag*”, Lauf, Germany.

GENCEL, O., OZEL, C., KOKSAL, F., ERDOGMUS, F., BARRERA, G.M., BROSTOW, W., (2011), “*Properties Of Concrete Paving Blocks Made With Waste Marble*” Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Bartin University, 74100 Bartin, Turkey, *Journal of Cleaner Production* 21 (2012) pp.62-70

- GREEN, D., *An Introduction to the Mechanical Properties of Ceramics*, Cambridge University Press, pp. 286-290, Cambridge, 1998.
- GUILLET, A., (2003) “*Treatment of fillers with organofunctional silanes, technology and Applications*”. *Macromolecular Symposia*, Weinheim, v. 194, n. 1, p. 63-74,
- HULL, D e CLYNE, T. W., (2005), “*An Introduction to Composite Materials*” - Ed. Cambridge University Press, Cambridge.
- HUNTER P., PULLAN A., (2001) “*Finite Element Method - Boundary Element Method*”, Department of Engineering Science The University of Auckland New Zealand, NZ.
- LEE, M.Y., KO, C.H.; CHANG, F.C., LO, S.L., LIN, J.D., SHAN, M.Y., LEE, J.C. (2008) - “*Artificial Stone Slab Production Using Waste Glass, Stone Fragments And Vacuum Vibratory Compaction - Cement & Concrete Composites*”, National Central University, Jhongli City, Taiwan, ROC.
- LEVY NETO, F. e PARDINI, L.C., (2006), “*Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia*”, Editora Edgard Blucher, São Paulo.
- LIMA, A. B. T., (2007), “*Aplicações de Cargas Minerais em Polímeros*”, (Dissertação de Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo -SP
- LIMA, F., HOLZMANN, R., (2012) “*Design e projetos em compósitos - Compositos I*”, Abmaco - São Paulo-SP- cap.11, pg.555-573.
- LU, C., DANZER R., FISCHER F.D. (2002), “*Fracture statistics of brittle materials: Weibull or normal distribution*”, *Physical Review E, Volume 65, 067102*, *Montanuniversita`t Leoben, A-8700 Leoben, Austria*
- MACHADO, F.B., MOREIRA, C.A., ZANARDO, A., ANDRE, A.C., GODOY, A.M., FERREIRA, J. A., GALEMBECK, T., NARDY, A.J.R., ARTUR, A.C., OLIVEIRA, (2015) M.A.F.de. *Atlas de Rochas*. [on-line]. ISBN: 85-89082-12-1. Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.rc.unesp.br/museudpm>. Arquivo capturado em 16 de novembro de 2015.
- MANO, E.B. (1991), “*Polímeros como materiais de engenharia*”, 1 ed. São Paulo: Blücher, p197.

- MATTHEUWS, F. L. e RAWLINGS, R. D., *Composite Materials: Engineering and Science*. Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, UK, 1994.
- MONTEIRO, A.L.A., (2001), “*Um Sistema para Cálculo da resistência Mecânica de materiais Frágeis pelo Uso do Método estatístico de Weibull*”, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Monografia de Especialização.
- MOTHE, C. G. ; MOTHE FILHO, H. F. ; BARROSO, E. V. ; POLIVANOV, H.,(2002) “*Thermal and mechanical study from granite and marble industry reject*”, *Thermochemical Acta* , v. 392-3, p. 47-50, 2002.
- MOTHE FILHO, H. F. ; ALMEIDA, V. C. ; MOTHE, C. G. (2001), “*Sintering of Granite and Marble Reject*”. *Key Engineering Materials*, v. 189-19, p. 132-137.
- NASH, W., “*Resistência dos Materiais*”, Mac Gral Hill, São Paulo 1992
- NETO, J. R. A., CARVALHO, L. H., ARAÚJO, E. M. (2007) “*Influência da Adição de uma Carga Nanoparticulada no Desempenho de Compósitos Poliuretano/Fibra de Juta*”, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 17, nº 1, p. 10-15.
- PARDINI, L.C., MANHANI, L. G. B., (2002), “*Influence of the Testing Gage Length on the Strength, Young’s Modulus and Weibull Modulus of Carbon Fibres and Glass Fibres*” Centro Técnico Aeroespacial, Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Materiais - AMR, 12228-904 São José dos Campos - SP, Brasil, *Materials Research* Vol. 5, No. 4,
- PIMENTA, S., PINHO S.T., (2011) “*Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook*”, *Waste Management*, vol.31, Issue 2, February 2011, Pages 378-392
- RABAHI, R.F., DINOAH, J., GUEDES, J., VIEIRA, M.C.O., (2007), “*Estudo da Influência da Fibra de Vidro nas Propriedades Mecânicas do Mármore Sintético*”, *Relatório de Curso na Pós-Graduação, PCMEC - UnB, Brasília*.
- RABAHI, R. F., (2010), “*Análise da resistência de vigas de mármore sintético através da distribuição estatística de Weibull*”, *Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia UnB, Brasília-DF*.
- REICHHOLD, *Product Bulletin - Polylite 32135-00 Engineered Cast Marble Resin*, Reichhold, Research Park, NC, USA, 2008

- REIS, J.M.L., CHIANELLI-JUNIOR, R., CARDOSO, J.L., MARINHO, F.J.V., (2011), “*Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar*”, Theoretical and Applied Mechanics Laboratory - LMTA, Mechanical Engineering Post Graduate Program - PGMEC, Universidade Federal Fluminense - UFF, Niteroi, RJ, Brazil
- RIBEIRO, F.M.M., PURQUERIO, B.M. (1999) “*Granito Sintético Para Estruturas de Equipamentos de Precisão de Pequeno Porte - Metodologia de Projeto*”, Universidade de São Paulo, USP - São Carlos, artigo apresentado no XV COBEM , Águas de Lindóia, São Paulo.
- RIBEIRO, R. C. C., ARRUDA, C. M. R., VIDAL, F. W. H., OLIVEIRA, M. G., (2011), “*Geração de compósitos poliméricos utilizando resíduos de rochas ornamentais como carga*”, 51ºCBQ -Congresso Brasileiro de Química, Associação Brasileira de Química -Rio de Janeiro - RJ – Brasil
- SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M.. (2005) “*Calcário e dolomito, Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações*”. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI., p. 363-387.
- SANTOS, G.T. (2008) “*Modelo de confiabilidade associando dados de garantia e pós-garantia a três comportamentos de falhas.*” (Tese de Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande dos Sul.
- SILVA, I., L., A., (2014), “*Propriedades E Estrutura De Compósitos Poliméricos Reforçados Com Fibras Contínuas De Juta*”, Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - Uenf Campos Dos Goytacazes - Rj
- SILVEIRA, C. C., (2006), “*Análise da Distribuição de Weibull aplicada à Resina Fenólica*”, Universidade Federal de Santa Catarina, SC
- SIQUEIRA, E.,J., FARIA, M.C.M., SILVA, F.A., BOTELHO, E. C., (2009) “*Estudo dos critérios de falhas em flexão em Compósitos PPS/Fibras de Carbono utilizando elementos finitos*”, Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA / Universidade Estadual Paulista - Unesp - FE - Campus Guaratinguetá/SP.
- SOUZA, L.R., RIBEIRO, R.C.C., CARRISO, R.C.C. , SILVA, L.P., VISCONTE, L.L.Y., PACHECO, E.B.A.V., (2008), “*Propriedades mecânicas e de alterabilidade*

*de compósitos constituídos por polipropileno e rejeitos de mármore*”, 48°CBQ (Congresso Brasileiro de Química), Rio de Janeiro-RJ.

TURELLA T.C., GRISON, K., SCIENZA, L., ZATTERA, A. J. (2013), “*Estudo Do Efeito Do Uso de Agente Compatibilizante em Compósitos de PEAD Reforçados com Carga Vegetal e Mineral*”, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CCET) - Universidade de Caxias do Sul - UCS - RS

XU, Y., P., ZHOU, D., CHEUNG, Y. K., (2008), “*Elasticity solution of clamped-simply supported beams with variable thickness*”, School of Science. Nanjing University of Science and Technology. Nanjing 2100094, P, R, China

WEIBULL, W., “A Statistical Theory of the Strength of Materials”, 1939, Ingeniörs Vetenskaps Akademiens, Ceneralstabens Litografiska Anstalts Föhlac, Handlingar Nr 151, Stocolmo, Suécia

WILKS,S.S.,(1942)“Determination of Sample Size for Setting Limits”. The Annals of Mathematical Statistics, n.12, p.91-96.

## **ANEXOS**

## ANEXO A - BOLETIM TÉCNICO

### ARAZYN 3.7 - BOLETIM

ARA QUÍMICA S/A. - RUA ARTHUR CÉSAR, 200  
18147-000 - ARAÇARIGUAMA - SP - BRASIL • TEL: 0 (XX) 11 4136 1900  
BTE DOCUMENTO 001023  
RESINA POLIÉSTER INSATURADO, ORTO-TEREFTÁLICA, MÉDIA  
REATIVIDADE

DESCRIÇÃO: A resina padrão da família AZ 3.7 de média reatividade e pré-acelerada apresenta, no estado líquido, viscosidade média e coloração castanha, boa molhabilidade.

Tabela a. 1 - PROPRIEDADES DA RESINA LÍQUIDA AZ 3.7 - Padrão

Viscosidade Brookfield (25°C/LVF sp 2/12 rpm), cps 650-800	Gel Time (25°C c/ 1,0 g MEK-P em 100 g resina), minutos 10' - 15'
Intervalo Pico, minutos max. 12'	Índice de Acidez (em solução), mg KOH/g de resina max. 25
Pico Exotérmico, °C max. 180°C	Teor de Sólidos, % min. 65 %

®Marca registrada da Ara Química S. A.

PROPRIEDADES MECANICAS - VALORES TÍPICOS\*

PROPRIEDADES FÍSICAS DA RESINA CURADA\*\* A 25 °C SEM REFORÇO ( pós cura de 2 horas à 80°C: TESTE VALOR MÉTODO DE TESTE

Tabela a. 2 - - Propriedades típicas do fabricante (Ara Química), Resina AZ 3.7

PROPRIEDADES DA RESINA LÍQUIDA AZ 3.7 - Padrão			
Propriedades	Unidades	Valores	Método de teste
Temperatura de Distorção Térmica	°C	75	ASTM D-648
Resistência à Flexão	MPa	82,74	ASTM D-790
Módulo na Flexão	GPa	2,48	ASTM D-790
Resistência à Tração	MPa	53,78	ASTM D-638
Módulo na Tração	GPa	1,34	ASTM D-638
% Alongamento	%	3.0	ASTM D-638

Tabela a. 3 - Propriedades típicas do fabricante (Reichhold) da Resina Polylyte® 32135-00 - Engineered

PROPRIEDADES FÍSICAS TÍPICAS			
PROPRIEDADES	UNIDADES	VALORES	MÉTODO DE TESTE
Dureza Barcol		35	ASTM D-2583
Temperatura de	°C	53	ASTM D-648
Resistência à Flexão	MPa	103,42	ASTM D-790
Módulo de Flexão	GPa	4,137	ASTM D-790
Resistência à	MPa	96,53	ASTM D-695
Resistência à Tração	MPa	48,26	ASTM D-638
Módulo de elasticidade	GPa	3,792	ASTM D-638
% Alongamento na	%	1.5	ASTM D-638
Absorção de	% ganho de	0.2	ASTM D-570
Absorção de	% ganho de	1.0	ASTM D-570

## ANEXO B - EXEMPLO DE DADOS DO ENSAIO MTS

Tabela b. 4 - Tabela exemplo de dados obtidos do CP grupo 22 - através da MTS 810

Tempo (s)	flecha $f$ (mm)	Carga $P$ (N)	Tempo (s)	flecha $f$ (mm)	Carga $P$ (N)	Tempo (s)	flecha $f$ (mm)	Carga $P$ (N)
0,33	0,002	29,814	12,67	0,211	160,954	25,00	0,415	278,078
0,67	0,008	34,178	13,00	0,217	164,412	25,33	0,423	281,221
1,00	0,017	40,186	13,33	0,222	167,620	25,67	0,427	283,945
1,33	0,023	44,050	13,67	0,228	170,802	26,00	0,433	286,948
1,67	0,027	47,155	14,00	0,233	174,035	26,33	0,439	289,718
2,00	0,033	50,253	14,33	0,238	177,355	26,67	0,443	292,499
2,33	0,038	53,417	14,67	0,244	180,566	27,00	0,450	295,572
2,67	0,044	57,118	15,00	0,249	183,888	27,33	0,455	298,388
3,00	0,049	60,372	15,33	0,256	187,042	27,67	0,460	301,583
3,33	0,054	63,858	15,67	0,260	190,071	28,00	0,467	304,282
3,67	0,060	67,588	16,00	0,266	193,371	28,33	0,472	307,060
4,00	0,065	71,240	16,33	0,272	196,396	28,67	0,479	309,868
4,33	0,071	74,839	16,67	0,276	199,792	29,00	0,482	312,492
4,67	0,078	78,615	17,00	0,283	203,050	29,33	0,490	315,346
5,00	0,084	82,156	17,33	0,289	206,055	29,67	0,495	317,959
5,33	0,088	85,856	17,67	0,293	209,355	30,00	0,499	320,478
5,67	0,095	89,261	18,00	0,298	212,692	30,33	0,505	323,115
6,00	0,100	92,768	18,33	0,305	216,182	30,67	0,511	325,658
6,33	0,105	96,280	18,67	0,310	219,446	31,00	0,516	328,099
6,67	0,110	99,916	19,00	0,316	222,745	31,33	0,522	330,797
7,00	0,116	103,125	19,33	0,322	226,407	31,67	0,527	332,648
7,33	0,121	106,479	19,67	0,328	229,772	32,00	0,532	335,346
7,67	0,128	110,091	20,00	0,334	233,050	32,33	0,538	337,607
8,00	0,133	113,223	20,33	0,339	236,365	32,67	0,543	339,803
8,33	0,138	116,841	20,67	0,345	239,378	33,00	0,549	342,345
8,67	0,144	120,071	21,00	0,350	242,590	33,33	0,555	344,291
9,00	0,149	123,372	21,33	0,356	245,766	33,67	0,561	346,692
9,33	0,155	126,889	21,67	0,360	248,640	34,00	0,567	348,868
9,67	0,160	130,158	22,00	0,367	251,886	34,33	0,572	350,825
10,00	0,165	133,634	22,33	0,373	254,731	34,67	0,577	352,973
10,33	0,171	136,979	22,67	0,378	257,688	35,00	0,583	354,675
10,67	0,177	140,381	23,00	0,384	260,778	35,33	0,590	355,544
11,00	0,182	143,593	23,33	0,389	263,687	35,67	0,596	354,316
11,33	0,187	147,278	23,67	0,394	266,693	36,00	0,600	349,257
11,67	0,193	150,643	24,00	0,399	269,496	36,33	0,611	1,150
12,00	0,199	154,129	24,33	0,405	272,392	36,67	0,615	1,096
12,33	0,204	157,709	24,67	0,411	275,395	37,00	0,619	0,862

Desde a primeira linha de dados aos 0,33s até a última linha aos 37s , que foi o tempo de duração do ensaio, o arquivo 22e2.dat (sempre identificando o grupo e os CPs), é alimentado com as informações já mencionadas com uma taxa de 3 pontos por segundo, que pode ser alterado de acordo com a necessidade de cada ensaio, com um avanço de 1mm/min, a cada minuto serão gerados com essa configuração, 180 linhas de dados por

minuto. Desses dados serão extraídos o deslocamento total (mm) e a carga máxima aplicada (N), que estão em destaque no exemplo da tabela 3.3.

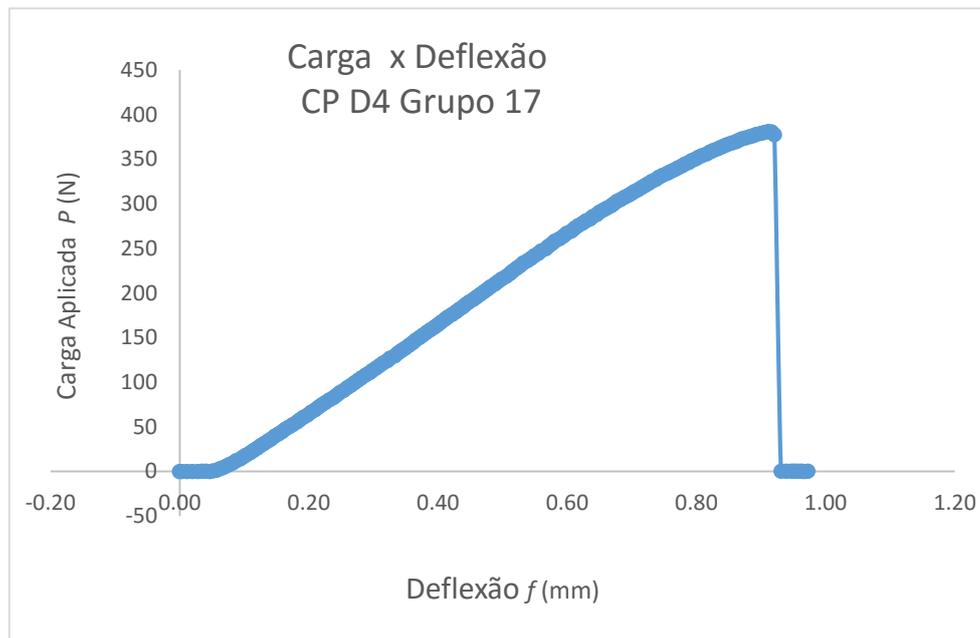


Figura b. 1 - Exemplo de diagrama Carga x deflexão obtido no ensaio de flexão.

## ANEXO C - DADOS DOS CORPOS DE PROVA

Tabela c. 4 - Dados dos CPs - Grupo 16

Grupo 16	espessura t (mm)				Força Ruptura (N)	Flecha (mm)	E (Gpa)	espessura t (mm)				w (mm)	Vão de ensaio (mm)
	1	2	3	4				5	6	7	8		
A1	8,80	9,10	8,68	8,90	487,14	0,65	12,87	8,00	8,56	9,40	9,96	39,00	124,00
B1	7,56	8,04	7,56	8,04	381,62	0,67	12,26	8,08	8,10	8,04	8,20	39,08	119,30
C1	8,58	8,62	8,64	8,60	493,22	0,70	11,71	9,30	9,10	8,30	8,30	38,94	119,30
D1	9,30	9,14	9,32	9,02	521,54	0,59	14,63	8,64	8,52	9,28	8,94	38,98	124,00
E1	7,72	8,00	7,68	8,00	374,97	0,65	12,48	7,66	8,36	8,34	7,90	38,98	119,30
F1	7,70	8,16	7,70	8,20	356,71	0,67	13,16	7,40	8,30	7,62	8,30	39,00	124,00
G1	7,36	7,70	7,26	7,62	328,05	0,71	12,70	7,00	7,90	8,00	8,40	38,88	124,00
A2	8,44	8,44	8,24	8,32	431,91	0,73	10,04	8,60	8,22	9,32	8,74	40,02	119,30
B2	8,64	8,16	8,64	8,22	437,64	0,62	14,29	8,78	8,40	8,30	8,00	39,96	124,00
C2	8,02	8,63	8,04	8,00	442,20	0,63	13,11	8,70	7,90	8,60	8,20	40,04	119,30
D2	9,30	8,60	9,30	8,60	508,75	0,78	9,67	9,30	8,60	9,30	8,60	40,00	119,30
E2	9,12	8,52	9,13	8,48	490,08	0,63	14,08	8,40	8,20	9,20	8,60	39,98	124,00
F2	8,70	8,40	8,60	8,40	407,20	0,68	10,93	8,20	7,90	8,40	8,40	39,78	119,30
G2	7,68	7,32	7,68	7,32	342,63	0,77	10,03	8,40	8,30	7,90	7,80	39,88	119,30
A3	8,18	7,26	8,20	7,26	357,76	0,69	12,42	7,90	7,40	9,00	8,60	39,16	124,00
B3	6,58	7,40	6,50	7,40	299,01	0,74	12,94	7,80	7,00	7,90	7,30	39,12	124,00
C3	7,16	8,04	7,16	8,04	333,88	0,94	8,92	7,20	7,80	7,20	7,80	39,24	119,30
D3	7,90	8,40	7,90	8,40	386,98	0,62	13,59	9,40	8,70	7,90	7,20	39,22	124,00
E3	8,18	9,08	8,16	9,07	463,97	0,61	15,08	7,90	7,30	9,50	8,80	39,12	124,00
F3	6,82	6,28	6,23	6,78	238,72	0,78	10,84	7,80	7,40	7,70	7,10	39,16	124,00
G3	8,50	8,00	8,50	8,00	419,28	0,64	13,32	8,50	8,10	7,90	7,50	39,08	119,30
A4	8,32	8,38	8,40	8,50	454,90	0,78	10,26	8,00	8,10	8,80	9,10	39,82	119,30
B4	7,86	7,84	7,86	7,85	383,04	0,82	10,61	7,40	7,30	8,10	8,00	39,64	119,30
C4	7,96	8,00	7,90	8,00	394,22	0,68	12,66	8,10	8,20	7,50	7,40	39,52	119,30
D4	8,12	8,36	8,12	8,36	401,75	0,68	11,29	8,20	8,40	8,10	8,30	39,50	119,30
E4	8,00	7,96	8,00	7,96	369,20	0,70	14,20	7,70	8,00	8,20	8,40	30,70	119,30
F4	8,00	8,20	8,10	8,30	398,20	0,74	10,99	8,10	8,20	7,70	7,90	39,46	119,30
G4	8,50	8,60	8,40	8,50	441,18	0,82	8,89	9,60	9,70	8,00	8,20	39,34	119,30
A5	8,60	8,00	8,70	8,30	450,74	0,81	9,90	8,20	7,60	9,30	8,80	39,92	119,30
B5	7,90	7,30	7,90	7,50	336,88	0,86	9,40	7,60	7,00	8,10	7,60	40,08	119,30
C5	7,40	6,88	7,40	6,88	320,20	0,73	13,18	7,80	7,50	7,70	7,10	40,10	124,00
D5	8,24	7,80	8,24	7,80	439,28	0,69	15,14	8,00	7,90	7,80	7,70	40,24	124,00
E5	7,18	7,10	7,18	7,10	327,02	0,72	13,23	7,70	7,50	8,00	7,70	40,14	124,00
F5	7,72	7,40	7,74	7,40	355,92	0,60	15,10	8,40	7,90	7,80	7,40	40,44	124,00
G5	7,90	7,60	7,90	7,80	393,80	0,67	12,80	7,80	7,50	8,30	8,00	40,10	119,30

Tabela c. 5 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 16

posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabi- lidade de Falha F(V)	ln[ln(1/(1-F(V)))]	posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabi- lidade de Falha F(V)	ln[ln(1/(1-F(V)))]	posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabi- lidade de Falha F(V)	ln[ln(1/(1-F(V)))]
1	25,20	3,23	1/35	0,028	-3,569	1	25,20	3,23	1*/20	0,048	-3,020	1	26,61	3,28	1*/15	0,063	-2,740
2	25,70	3,25	2/35	0,056	-2,862	2	25,70	3,25	2*/20	0,095	-2,302	2	26,99	3,30	2*/15	0,125	-2,013
3	26,36	3,27	3/35	0,083	-2,442	3	26,36	3,27	3*/20	0,143	-1,870	3	27,63	3,32	3*/15	0,188	-1,572
4	26,61	3,28	4/35	0,111	-2,139	4	26,81	3,29	4*/20	0,190	-1,554	4	28,01	3,33	4*/15	0,250	-1,246
5	26,81	3,29	5/35	0,139	-1,900	5	27,19	3,30	5*/20	0,238	-1,302	5	28,48	3,35	5*/15	0,313	-0,982
6	26,99	3,30	6/35	0,167	-1,702	6	27,33	3,31	6*/20	0,286	-1,089	6	28,60	3,35	6*/15	0,375	-0,755
7	27,19	3,30	7/35	0,194	-1,531	7	27,63	3,32	7*/20	0,333	-0,903	7	28,77	3,36	7*/15	0,438	-0,553
8	27,33	3,31	8/35	0,222	-1,381	8	27,78	3,32	8*/20	0,381	-0,735	8	29,13	3,37	8*/15	0,500	-0,367
9	27,63	3,32	9/35	0,250	-1,246	9	27,93	3,33	9*/20	0,429	-0,581	9	29,26	3,38	9*/15	0,563	-0,190
10	27,63	3,32	10/35	0,278	-1,123	10	28,04	3,33	10*/20	0,476	-0,436	10	29,36	3,38	10*/15	0,625	-0,019
11	27,78	3,32	11/35	0,306	-1,009	11	28,14	3,34	11*/20	0,524	-0,298	11	29,43	3,38	11*/15	0,688	0,151
12	27,93	3,33	12/35	0,333	-0,903	12	28,21	3,34	12*/20	0,571	-0,166	12	29,53	3,39	12*/15	0,750	0,327
13	28,01	3,33	13/35	0,361	-0,803	13	28,41	3,35	13*/20	0,619	-0,036	13	29,67	3,39	13*/15	0,813	0,515
14	28,04	3,33	14/35	0,389	-0,708	14	28,64	3,35	14*/20	0,667	0,094	14	29,72	3,39	14*/15	0,875	0,732
15	28,14	3,34	15/35	0,417	-0,618	15	28,72	3,36	15*/20	0,714	0,225	15	31,57	3,45	15*/15	0,938	1,020
16	28,21	3,34	16/35	0,444	-0,531	16	28,89	3,36	16*/20	0,762	0,361						
17	28,41	3,35	17/35	0,472	-0,448	17	28,97	3,37	17*/20	0,810	0,506						
18	28,48	3,35	18/35	0,500	-0,367	18	29,59	3,39	18*/20	0,857	0,666						
19	28,60	3,35	19/35	0,528	-0,287	19	30,58	3,42	19*/20	0,905	0,855						
20	28,64	3,35	20/35	0,556	-0,210	20	33,79	3,52	20*/20	0,952	1,113						
21	28,72	3,36	21/35	0,583	-0,133												
22	28,77	3,36	22/35	0,611	-0,057												
23	28,89	3,36	23/35	0,639	0,018												
24	28,97	3,37	24/35	0,667	0,094												
25	29,13	3,37	25/35	0,694	0,170												
26	29,26	3,38	26/35	0,722	0,248												
27	29,36	3,38	27/35	0,750	0,327												
28	29,43	3,38	28/35	0,778	0,408												
29	29,53	3,39	29/35	0,806	0,493												
30	29,59	3,39	30/35	0,833	0,583												
31	29,67	3,39	31/35	0,861	0,680												
32	29,72	3,39	32/35	0,889	0,787												
33	30,58	3,42	33/35	0,917	0,910												
34	31,57	3,45	34/35	0,944	1,061												
35	33,79	3,52	35/35	0,972	1,276												

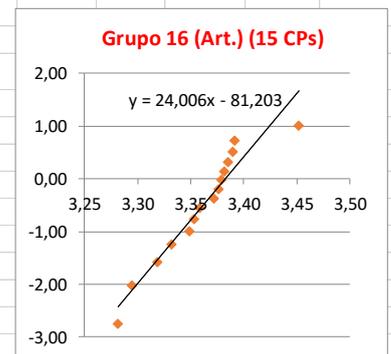
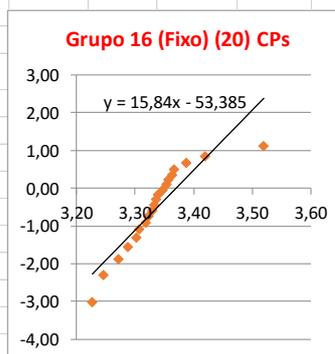
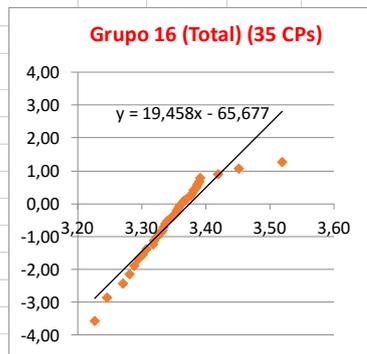


Tabela c. 6 - Dados dos CPs - Grupo 17

Grupo 17	espessura t (mm)				Força Ruptura (N)	Flecha (mm)	E (Gpa)	espessura t (mm)				w (mm)	Vão de ensaio (mm)
	1	2	3	4				5	6	7	8		
A1	8,10	8,44	8,10	8,50	446,10	0,74	11,97	7,20	7,80	8,60	8,90	39,20	119,30
B1	7,26	7,50	7,40	7,70	359,94	0,80	12,87	7,40	7,60	7,30	7,70	38,98	123,50
C1	7,60	7,50	7,50	7,50	367,60	0,83	11,24	7,50	7,76	7,40	7,50	39,26	119,30
D1	7,60	7,60	7,50	7,60	387,40	0,84	11,80	7,20	7,30	7,50	8,00	39,08	119,30
E1	7,00	7,30	7,10	7,30	337,52	0,91	11,54	7,10	7,70	7,20	7,30	39,28	123,50
F1													
G1	8,54	9,10	8,50	9,10	515,43	0,72	12,93	9,00	9,50	7,80	8,40	39,16	123,50
A2	8,46	7,62	8,50	7,64	411,59	0,82	11,07	7,98	7,22	9,18	8,44	39,28	123,50
B2	7,70	7,40	7,80	7,56	373,10	0,85	10,31	7,68	7,28	8,14	7,70	40,02	119,30
C2	7,70	6,90	7,48	7,10	344,20	0,90	11,54	6,80	6,20	7,50	7,20	40,22	119,30
D2	7,20	6,30	7,00	6,40	256,50	1,15	7,99	6,80	6,90	7,00	5,80	40,12	119,30
E2	7,30	7,10	7,30	7,10	338,20	0,98	10,79	7,30	7,00	6,80	6,40	40,00	119,30
F2	7,70	7,50	7,50	7,40	336,00	0,80	12,45	7,40	7,20	7,40	7,00	39,90	123,50
G2	8,20	8,00	8,20	8,00	476,70	0,98	9,22	8,90	8,60	8,56	7,30	39,86	119,30
A3	8,40	7,60	8,50	7,60	342,80	0,77	8,77	7,90	7,20	9,20	8,60	39,82	119,30
B3	8,30	7,50	8,30	7,40	382,54	0,78	12,51	8,40	7,60	7,80	7,10	39,46	123,50
C3	8,60	8,00	8,60	7,80	459,00	0,99	9,02	8,60	8,00	8,40	7,80	39,42	119,30
D3	8,70	7,80	7,70	7,90	433,56	0,83	11,43	8,40	7,90	8,50	8,10	39,50	123,50
E3	8,50	7,70	8,30	7,90	410,30	0,93	8,88	8,20	7,70	8,60	7,90	39,62	119,30
F3													
G3	8,70	8,20	8,60	8,30	433,27	0,69	12,24	9,00	8,70	8,40	8,00	39,44	123,50
A4	7,50	7,50	7,50	7,70				7,00	7,00	8,10	8,10	39,96	
B4	7,00	6,90	7,00	6,80	304,30	0,96	10,22	6,90	6,80	7,00	7,00	39,78	119,30
C4	7,30	7,40	7,10	7,30	346,40	0,81	12,19	7,40	7,60	6,90	6,90	39,54	119,30
D4	7,50	7,60	7,50	7,60	377,30	0,83	10,51	8,00	8,10	7,40	7,70	39,82	119,30
E4	8,00	8,10	7,90	8,20	411,50	0,78	11,55	7,60	7,70	7,90	8,00	39,44	119,30
F4	7,00	7,10	6,90	7,10	322,70	0,87	11,90	6,50	6,80	6,80	7,60	39,44	119,30
G4	7,40	7,50	7,30	7,40	327,80	0,83	9,90	8,50	8,70	6,50	6,90	39,24	119,30
A5	7,90	7,20	8,00	7,50	381,50	0,92	9,73	7,30	6,60	8,74	8,10	40,00	119,30
B5	7,90	7,10	7,84	7,20	371,84	0,80	13,35	7,90	7,40	7,46	6,70	40,14	123,50
C5	8,10	7,70	8,10	7,50				8,50	8,00	8,04	7,50	40,16	
D5	8,60	8,00	8,60	8,10	446,10	0,72	11,62	8,34	8,00	8,54	8,10	40,20	119,30
E5	8,64	8,16	8,64	8,14	466,20	0,96	9,13	8,40	7,90	8,50	8,00	40,18	119,30
F5	8,30	7,90	8,24	7,90	418,40	0,72	13,50	7,40	7,90	8,34	8,00	40,28	123,50
G5	7,84	8,50	8,84	8,24	477,66	0,74	10,76	9,50	9,10	8,20	8,00	40,32	119,30

Grupo 17 (20% Sint.+ 80% Calc)		Res. Intrinseca ( $\sigma_a$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull m	Mod.Elasticidade médio E (Gpa)	C.V. (E) %	Tensao de Rup. ( $\sigma_r$ ) (Mpa)	C.V. ( $\sigma_r$ ) %
31 CPs	Total	30,20	17,67	11,06	12,9%	29,34	5,9%
20 CPs	Sup. Fixo	29,87	15,43	10,69	13,5%	29,13	6,1%
11 CPs	Sup. Articulado	30,73	22,48	12,13	5,4%	29,94	4,6%

Tabela c. 7 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 16

posição	Res.Int. $\sigma_0$ (MPa)	$\ln \sigma$	posição relativa	Probabilidade de Falha F(V)	$\ln[\ln(1/(1-F(V)))]$	posição	Res.Int. $\sigma_0$ (MPa)	$\ln \sigma$	posição relativa	Probabilidade de Falha F(V)	$\ln[\ln(1/(1-F(V)))]$	posição	Res.Int. $\sigma_0$ (MPa)	$\ln \sigma$	posição relativa	Probabilidade de Falha F(V)	$\ln[\ln(1/(1-F(V)))]$
1	23,92	3,17	1*/31	0,031	-3,450	1	23,92	3,17	1*/20	0,048	-3,020	1	27,55	3,32	1*/11	0,083	-2,442
2	25,30	3,23	2*/31	0,063	-2,740	2	25,30	3,23	2*/20	0,095	-2,302	2	28,50	3,35	2*/11	0,167	-1,702
3	27,30	3,31	3*/31	0,094	-2,318	3	27,30	3,31	3*/20	0,143	-1,870	3	28,96	3,37	3*/11	0,250	-1,246
4	27,55	3,32	4*/31	0,125	-2,013	4	28,25	3,34	4*/20	0,190	-1,554	4	29,44	3,38	4*/11	0,333	-0,903
5	28,25	3,34	5*/31	0,156	-1,773	5	28,54	3,35	5*/20	0,238	-1,302	5	29,92	3,40	5*/11	0,417	-0,618
6	28,50	3,35	6*/31	0,188	-1,572	6	28,65	3,36	6*/20	0,286	-1,089	6	30,43	3,42	6*/11	0,500	-0,367
7	28,54	3,35	7*/31	0,219	-1,399	7	28,77	3,36	7*/20	0,333	-0,903	7	30,70	3,42	7*/11	0,583	-0,133
8	28,65	3,36	8*/31	0,250	-1,246	8	28,78	3,36	8*/20	0,381	-0,735	8	30,92	3,43	8*/11	0,667	0,094
9	28,77	3,36	9*/31	0,281	-1,108	9	28,81	3,36	9*/20	0,429	-0,581	9	31,41	3,45	9*/11	0,750	0,327
10	28,78	3,36	10*/31	0,313	-0,982	10	29,16	3,37	10*/20	0,476	-0,436	10	31,44	3,45	10*/11	0,833	0,583
11	28,81	3,36	11*/31	0,344	-0,865	11	29,19	3,37	11*/20	0,524	-0,298	11	31,57	3,45	11*/11	0,917	0,910
12	28,96	3,37	12*/31	0,375	-0,755	12	29,46	3,38	12*/20	0,571	-0,166						
13	29,16	3,37	13*/31	0,406	-0,651	13	29,59	3,39	13*/20	0,619	-0,036						
14	29,19	3,37	14*/31	0,438	-0,553	14	29,62	3,39	14*/20	0,667	0,094						
15	29,44	3,38	15*/31	0,469	-0,458	15	29,67	3,39	15*/20	0,714	0,225						
16	29,46	3,38	16*/31	0,500	-0,367	16	29,67	3,39	16*/20	0,762	0,361						
17	29,59	3,39	17*/31	0,531	-0,277	17	29,75	3,39	17*/20	0,810	0,506						
18	29,62	3,39	18*/31	0,563	-0,190	18	30,61	3,42	18*/20	0,857	0,666						
19	29,67	3,39	19*/31	0,594	-0,104	19	30,92	3,43	19*/20	0,905	0,855						
20	29,67	3,39	20*/31	0,625	-0,019	20	32,62	3,48	20*/20	0,952	1,113						
21	29,75	3,39	21*/31	0,656	0,066												
22	29,92	3,40	22*/31	0,688	0,151												
23	30,43	3,42	23*/31	0,719	0,238												
24	30,61	3,42	24*/31	0,750	0,327												
25	30,70	3,42	25*/31	0,781	0,419												
26	30,92	3,43	26*/31	0,813	0,515												
27	30,92	3,43	27*/31	0,844	0,619												
28	31,41	3,45	28*/31	0,875	0,732												
29	31,44	3,45	29*/31	0,906	0,862												
30	31,57	3,45	30*/31	0,938	1,020												
31	32,62	3,48	31*/31	0,969	1,243												

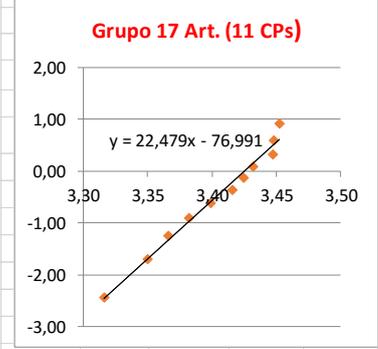
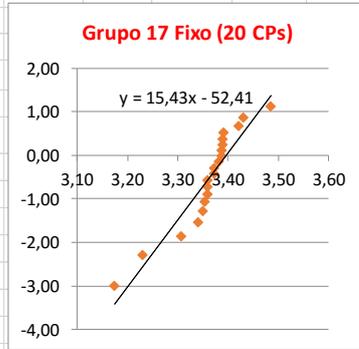
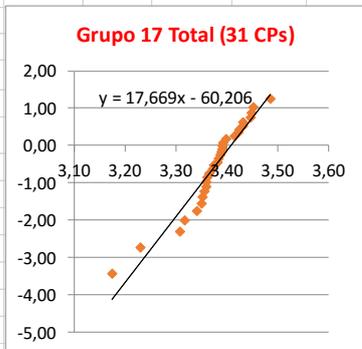


Tabela c. 8 - Dados dos CPs - Grupo 18

Grupo 18	espessura t (mm)				Força Ruptura (N)	Flecha (mm)	E (Gpa)	espessura t (mm)				w (mm)	Vão de ensaio (mm)
	1	2	3	4				5	6	7	8		
A1	7,48	7,72	7,49	7,71	359,20	0,80	10,00	7,44	7,62	9,92	10,00	39,20	124,00
B1	8,03	8,09	8,03	8,09	391,30	0,87	11,21	7,52	7,86	7,64	7,72	39,20	124,00
C1	7,69	7,23	7,69	7,25	344,40	0,85	11,04	8,26	7,68	7,68	7,72	39,08	124,00
D1	8,04	7,48	8,10	7,58				7,96	7,52	8,34	7,66	39,20	
E1	8,34	8,23	8,35	8,22	414,90	0,80	11,93	7,74	7,94	8,00	7,66	39,56	124,00
F1	7,10	7,56	6,98	7,40				6,72	7,36	7,66	6,90	39,56	
G1	7,94	8,90	7,66	8,26				8,36	8,94	6,68	7,06	39,32	
A2	8,54	8,09	8,54	8,11	456,60	0,84	10,44	8,58	8,36	8,96	9,00	40,08	124,00
B2	7,56	7,04	7,62	7,18				7,04	6,52	8,54	8,18	39,96	
C2													
D2	8,76	7,51	8,77	7,51	427,20	0,82	10,73	8,82	8,00	9,00	8,26	40,04	124,00
E2	8,32	7,15	8,31	7,15	403,60	0,84	11,44	7,76	7,68	8,94	8,22	39,96	124,00
F2	7,58	7,29	7,57	7,31	320,30	0,83	10,90	7,56	7,50	7,70	7,54	39,90	124,00
G2	8,17	7,96	8,18	7,96	398,10	0,81	9,38	9,82	9,70	8,88	7,72	39,96	124,00
A3	7,89	7,21	7,91	7,22	359,10	0,90	9,77	7,06	6,28	10,12	9,66	39,22	124,00
B3	7,41	6,58	7,42	6,69	286,80	0,97	10,07	7,70	7,00	7,32	6,58	39,32	124,00
C3	8,33	7,42	8,31	7,41	403,50	0,86	11,78	8,56	7,86	7,76	7,14	39,28	124,00
D3	8,47	7,51	8,45	7,49	404,90	0,80	11,76	8,26	7,76	8,60	7,92	39,22	124,00
E3	7,86	7,06	7,85	7,05	314,00	0,87	11,15	7,22	6,68	7,24	7,66	39,22	124,00
F3	7,43	6,78	7,41	6,78	319,20	0,92	11,11	7,90	7,82	7,30	6,50	39,22	124,00
G3	7,81	7,39	7,81	7,37	360,90	0,90	9,12	9,58	9,44	7,96	7,64	39,08	124,00
A4	7,12	7,25	7,12	7,25	332,80	1,00	9,51	7,00	7,10	8,56	8,60	39,52	124,00
B4	7,26	7,19	7,28	7,17	306,70	0,95	9,92	7,30	7,10	8,00	7,20	39,68	124,00
C4	8,21	8,36	8,22	8,37	450,60	0,93	10,45	9,00	9,20	7,20	7,30	39,62	124,00
D4	8,52	8,96	8,51	8,98	487,20	0,85	9,40	9,00	9,80	9,20	9,20	39,60	124,00
E4	8,02	8,26	8,02	8,24	395,50	0,75	11,09	7,60	7,90	9,10	9,40	39,38	124,00
F4	7,62	7,81	7,62	7,83	358,20	0,90	10,07	7,90	8,00	8,00	7,80	39,34	124,00
G4	7,38	7,74	7,39	7,75	364,10	0,82	9,16	9,90	10,60	8,20	7,90	39,58	124,00
A5	8,26	7,92	8,26	7,91	408,99	0,87	10,20	8,30	7,80	8,62	8,50	39,88	124,00
B5	7,82	6,94	7,82	6,96	349,60	0,87	10,24	8,30	7,80	8,60	7,80	40,12	124,00
C5	8,06	7,95	8,06	7,96	395,70	0,84	10,91	8,10	8,00	8,00	7,90	40,14	124,00
D5	6,77	6,96	6,78	6,95	300,00	0,83	11,60	7,00	7,88	7,36	7,70	40,22	124,00
E5	6,75	6,99	6,78	7,02	287,80	1,08	9,62	6,90	6,74	6,84	7,24	40,08	124,00
F5	7,92	8,52	7,92	8,51	358,00	0,95	10,22	7,44	6,68	7,04	6,72	40,14	124,00
G5	8,11	7,78	8,12	7,79	414,70	0,90	11,94	7,90	7,56	7,40	6,98	40,22	124,00

Grupo 18 (30% Sint. + 70% Calc)		Res. Intrinseca ( $\sigma_0$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull <i>m</i>	Mod. Elasticidade médio E (Gpa)	C.V. (E) %	Tensão de Rup. ( $\sigma_r$ ) (Mpa)	C.V. ( $\sigma_r$ ) %
30	Total	30,64	19,46	10,54	8,0%	29,12	4,9%

Tabela c. 9 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 16

posição	Res.Int. $\sigma_0$ (MPa)	$\ln \sigma$	posição relativa	Probabi- lidade de Falha F(V)	$\ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$	posição	Res.Int. $\sigma_0$ (MPa)	$\ln \sigma$	posição relativa	Probabi- lidade de Falha F(V)	$\ln\{\ln[1/(1-F(V))]\}$
1	24,57	3,20	1*/30	0,032	-3,418	1	27,41	3,31	1*/30	0,032	-3,418
2	27,43	3,31	2*/30	0,065	-2,708	2	28,07	3,33	2*/30	0,065	-2,708
3	27,49	3,31	3*/30	0,097	-2,285	3	28,43	3,35	3*/30	0,097	-2,285
4	28,02	3,33	4*/30	0,129	-1,979	4	28,72	3,36	4*/30	0,129	-1,979
5	28,18	3,34	5*/30	0,161	-1,738	5	29,12	3,37	5*/30	0,161	-1,738
6	28,60	3,35	6*/30	0,194	-1,537	6	29,66	3,39	6*/30	0,194	-1,537
7	29,01	3,37	7*/30	0,226	-1,363	7	29,68	3,39	7*/30	0,226	-1,363
8	29,37	3,38	8*/30	0,258	-1,209	8	29,70	3,39	8*/30	0,258	-1,209
9	29,44	3,38	9*/30	0,290	-1,070	9	29,75	3,39	9*/30	0,290	-1,070
10	29,47	3,38	10*/30	0,323	-0,943	10	29,84	3,40	10*/30	0,323	-0,943
11	29,48	3,38	11*/30	0,355	-0,825	11	29,86	3,40	11*/30	0,355	-0,825
12	29,70	3,39	12*/30	0,387	-0,714	12	30,15	3,41	12*/30	0,387	-0,714
13	29,72	3,39	13*/30	0,419	-0,610	13	30,20	3,41	13*/30	0,419	-0,610
14	29,78	3,39	14*/30	0,452	-0,510	14	30,32	3,41	14*/30	0,452	-0,510
15	29,78	3,39	15*/30	0,484	-0,413	15	30,34	3,41	15*/30	0,484	-0,413
16	29,94	3,40	16*/30	0,516	-0,320	16	30,42	3,41	16*/30	0,516	-0,320
17	30,13	3,41	17*/30	0,548	-0,230	17	30,47	3,42	17*/30	0,548	-0,230
18	30,15	3,41	18*/30	0,581	-0,140	18	30,49	3,42	18*/30	0,581	-0,140
19	30,33	3,41	19*/30	0,613	-0,052	19	30,57	3,42	19*/30	0,613	-0,052
20	30,34	3,41	20*/30	0,645	0,035	20	30,64	3,42	20*/30	0,645	0,035
21	30,63	3,42	21*/30	0,677	0,123	21	30,73	3,43	21*/30	0,677	0,123
22	30,80	3,43	22*/30	0,710	0,212	22	30,78	3,43	22*/30	0,710	0,212
23	30,89	3,43	23*/30	0,742	0,303	23	31,35	3,45	23*/30	0,742	0,303
24	31,28	3,44	24*/30	0,774	0,397	24	31,50	3,45	24*/30	0,774	0,397
25	31,42	3,45	25*/30	0,806	0,496	25	31,90	3,46	25*/30	0,806	0,496
26	31,51	3,45	26*/30	0,839	0,601	26	32,43	3,48	26*/30	0,839	0,601
27	31,70	3,46	27*/30	0,871	0,717	27	32,72	3,49	27*/30	0,871	0,717
28	31,83	3,46	28*/30	0,903	0,848	28	33,62	3,52	28*/30	0,903	0,848
29	31,87	3,46	29*/30	0,935	1,008	29	34,05	3,53	29*/30	0,935	1,008
30	32,48	3,48	30*/30	0,968	1,234	30	34,26	3,53	30*/30	0,968	1,234

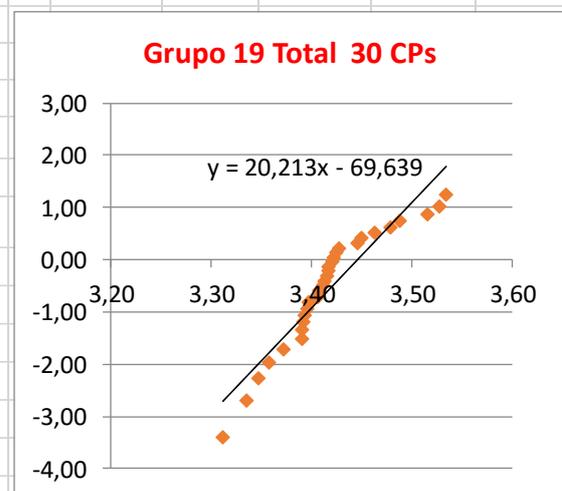
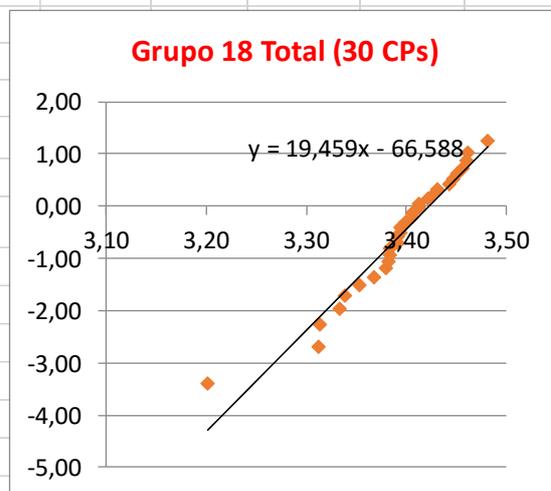


Tabela c. 10 - Dados dos CPs - Grupo 19

Grupo 19	espessura t (mm)				Força Ruptura (N)	Flecha (mm)	E (Gpa)	espessura t (mm)				w (mm)	Vão de ensaio (mm)
	1	2	3	4				5	6	7	8		
A1	7,42	7,58	7,42	7,60	385,71	0,98	9,99	6,84	7,26	8,98	9,28	39,12	123,50
B1	7,22	7,56	7,22	7,56	350,55	0,98	10,70	7,46	7,86	6,92	7,32	39,02	123,50
C1	8,18	8,10	8,18	7,98	421,10	0,82	11,94	8,64	8,46	7,52	7,30	38,90	123,50
D1	9,08	8,52	9,10	8,54	503,76	0,85	11,22	8,18	8,04	8,94	8,40	39,24	123,50
E1	7,48	7,50	7,48	7,54	355,95	0,83	11,69	6,98	7,52	8,32	7,98	39,26	123,50
F1	6,92	7,78	6,92	7,78	338,35	0,91	11,43	6,98	7,50	7,10	7,54	39,12	123,50
G1	7,52	8,22	7,52	8,18				8,88	9,54	7,06	7,42	39,12	
A2	8,14	7,58	8,14	7,58	455,17	1,02	10,07	7,10	7,02	9,54	9,22	40,08	123,50
B2	7,38	7,04	7,38	7,04				7,34	6,92	7,32	6,98	39,98	
C2	8,18	7,26	8,12	7,30	406,52	0,98	10,91	8,28	7,54	7,38	6,98	40,16	123,50
D2	8,14	7,24	8,14	7,24	381,96	0,96	10,43	7,74	7,08	8,18	7,46	40,10	123,50
E2	7,84	6,94	7,88	6,94	352,45	0,91	11,51	7,34	6,92	7,76	7,00	40,14	123,50
F2	7,16	6,96	7,16	6,96				7,10	6,88	7,22	6,98	39,88	
G2	7,20	7,22	7,20	7,16	330,70	0,96	10,11	8,48	8,38	6,82	6,64	39,78	123,50
A3	8,00	7,24	8,26	7,24	385,05	0,93	10,00	7,46	6,74	9,70	8,70	39,24	123,50
B3	7,70	6,78	7,70	6,78				7,26	6,52	7,64	6,86	39,14	
C3	7,96	6,96	8,00	6,96	398,20	0,99	11,61	8,22	7,62	7,36	6,58	39,32	123,50
D3	8,26	7,36	8,26	7,36	377,76	0,83	10,99	8,58	7,54	8,42	7,46	39,40	123,50
E3	8,36	7,58	8,36	7,64	417,51	0,90	11,30	7,84	6,92	8,54	7,72	39,48	123,50
F3	7,24	6,40	7,30	6,38	284,53	1,05	9,92	7,00	6,32	7,58	6,86	39,34	123,50
G3	7,76	6,82	7,76	6,82				8,84	8,68	6,76	6,26	39,26	
A4	7,68	7,88	7,68	7,88	392,96	0,92	9,87	7,22	7,12	9,28	9,22	39,82	123,50
B4	7,12	7,02	7,06	7,02	324,27	0,99	11,40	6,58	6,64	7,24	7,18	39,68	123,50
C4	7,32	7,42	7,32	7,42	363,41	0,87	12,80	7,72	8,04	6,58	6,48	39,54	123,50
D4	7,72	8,18	7,72	8,28	387,45	0,81	11,12	8,22	8,30	7,78	7,78	39,70	123,50
E4	7,82	7,90	7,82	7,90	398,60	0,90	11,74	6,74	6,96	7,96	8,24	39,40	123,50
F4	6,60	7,00	6,62	6,94	290,76	1,08	10,52	6,48	6,48	6,80	6,94	39,36	123,50
G4	7,10	6,88	6,96	6,88	282,16	0,96	10,16	7,68	8,06	6,30	6,22	39,42	123,50
A5	7,88	7,06	7,82	7,12	386,11	0,99	10,49	7,28	6,78	8,68	8,04	40,18	123,50
B5	8,00	7,14	8,00	7,12	375,43	0,98	10,66	8,08	7,34	7,66	6,74	40,08	123,50
C5	7,92	7,58	7,98	7,58	447,37	1,03	11,13	7,56	7,56	8,06	7,42	40,12	123,50
D5	7,96	7,44	7,88	7,44	417,94	0,98	10,37	8,38	8,32	7,74	7,60	40,12	123,50
E5	8,38	8,44	8,38	8,44	467,84	0,87	11,40	7,80	7,66	8,42	8,20	40,08	123,50
F5	6,88	6,58	6,88	6,58	295,72	1,02	10,52	6,46	5,98	7,78	7,74	40,12	123,50
G5	7,00	6,48	7,00	6,46	276,83	1,07	9,36	7,84	7,64	6,64	5,84	40,28	123,50

Grupo 19 (40% Sint.+ 60% Calc)	Res. Intrinseca ( $\sigma_0$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull <i>m</i>	Mod.Elasticidade médio E (Gpa)	C.V. (E) %	Tensao de Rup. ( $\sigma_r$ ) (Mpa)	C.V. ( $\sigma_r$ ) %
30 Total	31,36	20,21	10,85	6,9%	30,57	5,3%

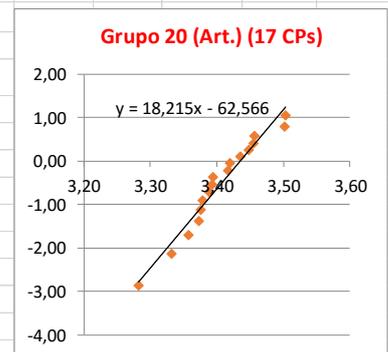
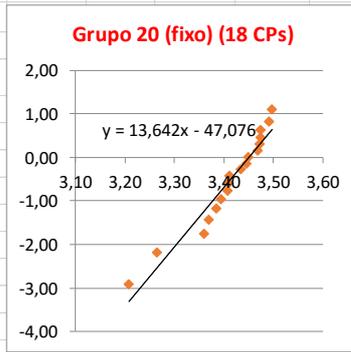
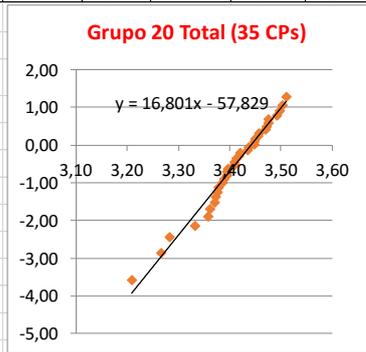
Tabela c. 11 - Dados dos CPs - Grupo 20

Grupo 20	espessura t (mm)				Força Ruptura (N)	Flecha (mm)	E (Gpa)	espessura t (mm)				w (mm)	Vão de ensaio (mm)
	1	2	3	4				5	6	7	8		
A1	6,62	7,27	6,64	7,30	340,65	1,06	10,33	6,43	7,02	6,84	7,54	39,21	119,30
B1	6,05	6,24	6,07	6,26	238,71	1,34	7,79	5,87	6,15	6,51	7,06	39,12	119,30
C1	6,68	6,70	6,69	6,71	321,42	1,15	10,49	7,09	7,00	5,85	6,21	39,06	119,30
D1	6,68	6,72	6,69	6,73	297,63	1,08	9,39	6,81	7,10	6,94	6,95	39,15	119,30
E1	7,18	7,78	7,20	7,80	346,14	1,10	9,46	7,02	7,68	6,84	7,17	39,25	124,00
F1	6,94	7,58	6,96	7,60	332,48	1,02	10,22	6,84	7,37	6,86	7,58	39,30	124,00
G1	7,42	8,23	7,44	8,22	382,61	1,01	10,19	7,51	8,13	6,73	7,27	39,20	124,00
A2	8,02	7,15	8,02	7,21	412,62	1,11	10,53	7,10	6,75	7,97	7,27	40,00	124,00
B2	7,16	7,08	7,20	7,09	366,28	1,11	9,58	7,66	7,20	6,98	6,74	40,00	119,30
C2	8,10	7,45	8,12	7,44	399,56	0,91	10,52	7,83	7,43	7,48	7,10	40,07	119,30
D2	7,93	7,43	7,93	7,45	411,29	0,99	9,87	7,69	7,34	7,79	7,53	40,20	119,30
E2	7,87	7,49	7,88	7,51	399,18	0,93	10,50	7,29	7,22	7,93	7,38	40,00	119,30
F2	7,29	7,85	7,30	7,86	316,85	1,00	8,82	7,10	6,78	7,11	6,75	39,93	119,30
G2	7,58	7,24	7,60	7,25	357,21	0,94	10,03	7,78	7,56	7,20	6,86	39,95	119,30
A3	8,08	7,22	8,09	7,21	370,61	0,96	9,87	8,26	7,39	8,10	7,29	39,55	124,00
B3	7,83	7,14	7,85	7,15	376,86	1,09	10,03	7,39	6,42	8,28	7,25	39,40	124,00
C3	7,32	6,47	7,33	6,48	318,24	1,06	10,56	7,58	6,77	7,14	6,32	39,57	124,00
D3	7,94	7,16	7,95	7,18	369,88	0,97	10,65	8,12	7,47	7,30	6,85	39,41	124,00
E3	8,75	8,00	8,74	7,99	450,45	0,89	11,23	8,07	8,01	8,06	7,47	39,22	124,00
F3	8,19	7,59	8,20	7,60	383,92	0,94	10,53	7,10	6,41	8,62	8,12	39,30	124,00
G3	7,66	6,98	7,68	7,00	351,18	1,08	9,33	7,65	7,40	6,98	6,45	39,21	119,30
A4	7,26	6,93	7,28	6,95	293,88	0,88	9,88	7,00	7,12	7,15	7,30	39,76	119,30
B4	7,69	7,83	7,70	7,82	441,24	1,03	10,77	7,31	7,39	7,21	7,23	39,68	119,30
C4	7,35	7,38	7,36	7,40	364,62	0,99	10,34	6,92	7,04	7,21	7,40	39,57	119,30
D4	7,27	7,61	7,30	7,63	314,43	0,93	10,05	7,31	7,45	6,92	7,13	39,52	124,00
E4	7,42	7,79	7,44	7,80	411,18	1,06	9,53	7,88	8,11	7,04	7,35	39,31	119,30
F4	8,26	8,66	8,28	8,70	470,54	0,96	10,33	7,96	8,29	7,91	8,12	39,24	124,00
G4	7,75	7,85	7,77	7,84	421,30	0,92	10,12	7,93	7,85	7,83	8,16	39,35	119,30
A5	8,22	7,51	8,23	7,49	421,39	0,99	10,57	7,85	7,23	8,26	7,45	40,04	124,00
B5	7,98	7,19	8,00	7,20	411,38	1,11	10,50	7,10	6,75	7,97	7,27	40,00	124,00
C5	7,44	6,75	7,45	6,77	313,71	0,90	10,56	7,70	7,04	7,65	6,73	40,28	124,00
D5	8,07	7,63	8,08	7,64	447,52	1,03	10,31	7,59	7,04	7,64	7,39	40,21	119,30
E5	7,22	6,46	7,24	6,50	284,02	0,93	10,97	6,55	6,38	7,49	7,02	40,18	124,00
F5	7,18	6,89	7,20	6,90	348,16	0,97	11,42	7,21	6,83	6,70	6,57	40,00	119,30
G5	6,62	6,38	6,61	6,40	269,65	1,17	8,88	7,12	6,62	6,92	6,60	40,45	124,00

Grupo 20 (50% Sint. + 50% Calc)		Res. Intrínseca ( $\sigma_0$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull <i>m</i>	Mod. Elasticidade médio E (Gpa)	C.V. (E) %	Tensão de Rup. ( $\sigma_r$ ) (Mpa)	C.V. ( $\sigma_r$ ) %
35 CPs	Total	31,26	16,80	10,12	6,9%	30,32	6,4%
18 CPs	Sup. Fixo	31,54	13,64	9,95	7,9%	30,43	7,1%
17 CPs	Sup. Articulado	31,04	18,22	10,30	5,2%	30,21	5,6%

Tabela c. 12 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 20

posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabilidade de Falha F(V)	ln[ln(1/(1-F(V)))]	posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabilidade de Falha F(V)	ln[ln(1/(1-F(V)))]	posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabilidade de Falha F(V)	ln[ln(1/(1-F(V)))]
1	24,75	3,21	1/35	0,028	-3,569	1	24,75	3,21	1*/18	0,053	-2,918	1	26,65	3,28	1*/17	0,056	-2,862
2	26,20	3,27	2/35	0,056	-2,862	2	26,20	3,27	2*/18	0,105	-2,196	2	27,98	3,33	2*/17	0,111	-2,139
3	26,65	3,28	3/35	0,083	-2,442	3	28,82	3,36	3*/18	0,158	-1,761	3	28,72	3,36	3*/17	0,167	-1,702
4	27,98	3,33	4/35	0,111	-2,139	4	29,08	3,37	4*/18	0,211	-1,442	4	29,15	3,37	4*/17	0,222	-1,381
5	28,72	3,36	5/35	0,139	-1,900	5	29,50	3,38	5*/18	0,263	-1,186	5	29,24	3,38	5*/17	0,278	-1,123
6	28,82	3,36	6/35	0,167	-1,702	6	29,83	3,40	6*/18	0,316	-0,969	6	29,32	3,38	6*/17	0,333	-0,903
7	29,08	3,37	7/35	0,194	-1,531	7	30,22	3,41	7*/18	0,368	-0,778	7	29,63	3,39	7*/17	0,389	-0,708
8	29,15	3,37	8/35	0,222	-1,381	8	30,26	3,41	8*/18	0,421	-0,604	8	29,77	3,39	8*/17	0,444	-0,531
9	29,24	3,38	9/35	0,250	-1,246	9	30,34	3,41	9*/18	0,474	-0,443	9	29,78	3,39	9*/17	0,500	-0,367
10	29,32	3,38	10/35	0,278	-1,123	10	31,00	3,43	10*/18	0,526	-0,291	10	30,49	3,42	10*/17	0,556	-0,210
11	29,50	3,38	11/35	0,306	-1,009	11	31,40	3,45	11*/18	0,579	-0,145	11	30,56	3,42	11*/17	0,611	-0,057
12	29,63	3,39	12/35	0,333	-0,903	12	31,47	3,45	12*/18	0,632	-0,001	12	31,05	3,44	12*/17	0,667	0,094
13	29,77	3,39	13/35	0,361	-0,803	13	32,12	3,47	13*/18	0,684	0,142	13	31,42	3,45	13*/17	0,722	0,248
14	29,78	3,39	14/35	0,389	-0,708	14	32,21	3,47	14*/18	0,737	0,289	14	31,67	3,46	14*/17	0,778	0,408
15	29,83	3,40	15/35	0,417	-0,618	15	32,28	3,47	15*/18	0,789	0,443	15	31,69	3,46	15*/17	0,833	0,583
16	30,22	3,41	16/35	0,444	-0,531	16	32,30	3,48	16*/18	0,842	0,613	16	33,18	3,50	16*/17	0,889	0,787
17	30,26	3,41	17/35	0,472	-0,448	17	32,85	3,49	17*/18	0,895	0,812	17	33,22	3,50	17*/17	0,944	1,061
18	30,34	3,41	18/35	0,500	-0,367	18	33,05	3,50	18*/18	0,947	1,080						
19	30,49	3,42	19/35	0,528	-0,287												
20	30,56	3,42	20/35	0,556	-0,210												
21	31,00	3,43	21/35	0,583	-0,133												
22	31,05	3,44	22/35	0,611	-0,057												
23	31,40	3,45	23/35	0,639	0,018												
24	31,42	3,45	24/35	0,667	0,094												
25	31,47	3,45	25/35	0,694	0,170												
26	31,67	3,46	26/35	0,722	0,248												
27	31,69	3,46	27/35	0,750	0,327												
28	32,12	3,47	28/35	0,778	0,408												
29	32,21	3,47	29/35	0,806	0,493												
30	32,28	3,47	30/35	0,833	0,583												
31	32,30	3,48	31/35	0,861	0,680												
32	32,85	3,49	32/35	0,889	0,787												
33	33,05	3,50	33/35	0,917	0,910												
34	33,18	3,50	34/35	0,944	1,061												
35	33,46	3,51	35/35	0,972	1,276												



$LN(1/(1-0,63)) = 0,9943$

Tabela c. 13 - Dados dos CPs - Grupo 21

Grupo 21	espessura t (mm)				Força Ruptura (N)	Flecha (mm)	E (Gpa)	espessura t (mm)				w (mm)	Vão de ensaio (mm)
	1	2	3	4				5	6	7	8		
A1	8,02	8,35	8,03	8,33	485,32	0,99	9,30	7,37	7,95	9,02	9,31	39,21	119,30
B1	7,01	7,56	7,01	7,54	384,63	1,17	9,12	7,10	7,26	7,32	7,63	39,31	119,30
C1	7,03	6,53	7,01	6,72	295,36	1,02	9,66	6,93	6,82	6,92	7,12	39,35	124,00
D1	7,46	7,31	7,44	7,33	376,11	1,40	7,74	7,19	7,08	7,16	6,77	39,24	119,30
E1	7,11	7,10	7,11	7,28	340,00	1,15	9,63	6,63	7,33	7,19	7,12	39,46	124,00
F1	6,51	7,17	6,51	7,39	316,96	1,08	9,27	6,95	7,74	6,54	7,42	39,34	124,00
G1	7,28	8,11	7,31	8,29	393,43	0,93	9,52	8,41	9,46	6,89	7,49	39,42	124,00
A2	7,73	6,99	7,74	7,01	373,90	1,17	8,44	7,21	6,77	8,06	7,47	40,15	119,30
B2	7,13	6,45	7,12	6,64	288,37	1,09	8,73	6,95	6,68	7,13	6,78	39,93	124,00
C2	8,05	7,26	8,04	7,47	390,58	1,02	10,35	8,27	7,72	6,96	6,44	40,28	124,00
D2	8,24	7,45	8,25	7,47	435,52	1,22	7,92	8,06	7,10	8,27	7,54	40,31	119,30
E2	7,32	6,88	7,31	6,90	348,40	1,20	8,47	6,97	6,81	7,79	6,96	40,34	119,30
F2	7,29	7,18	7,31	7,19	340,01	1,23	8,20	7,25	6,99	6,86	6,77	39,85	119,30
G2	7,63	7,52	7,63	7,50	388,54	1,08	8,42	8,55	8,86	7,12	6,82	39,80	119,30
A3	7,96	6,90	7,74	7,12	355,82	1,03	9,37	7,66	6,75	8,57	7,83	39,27	124,00
B3	7,58	6,64	7,40	6,86	330,04	1,05	10,12	7,01	6,21	7,51	6,71	39,34	124,00
C3	7,23	6,36	7,24	6,38	318,60	1,45	7,38	7,69	6,79	7,00	6,07	39,37	119,30
D3	8,00	7,19	8,02	7,21	419,74	1,29	7,98	8,26	7,50	7,79	6,84	39,36	119,30
E3	8,23	7,41	8,24	7,42	412,80	1,03	9,38	7,58	7,11	8,32	7,55	39,27	119,30
F3	7,85	7,20	7,63	7,01	350,00	0,95	9,69	7,95	7,60	7,74	6,99	39,43	124,00
G3	8,12	7,35	8,11	7,33	379,42	0,97	8,67	8,51	8,08	7,84	7,56	39,23	119,30
A4	7,03	7,24	7,04	7,26	352,70	1,08	8,74	6,80	6,97	8,16	8,47	39,58	119,30
B4	6,51	6,91	6,52	6,93	317,72	1,18	9,30	6,54	6,69	6,92	7,11	39,63	119,30
C4													
D4	6,92	7,18	6,91	7,20	331,92	1,19	8,96	6,77	7,43	6,39	6,78	39,46	119,30
E4	6,88	6,49	6,90	6,51	279,90	1,23	7,85	6,33	6,89	7,01	7,31	39,22	119,30
F4	6,87	7,25	6,88	7,46	306,20	1,17	9,08	6,76	7,19	6,39	6,99	39,33	124,00
G4	7,44	7,59	7,45	7,61	356,40	1,08	8,14	8,13	8,73	6,76	7,07	39,14	119,30
A5	7,80	6,95	7,58	6,93	375,82	1,08	9,73	6,99	6,31	8,15	7,85	40,03	124,00
B5	7,53	6,68	7,34	6,69	336,81	1,07	10,56	7,58	7,08	6,98	6,29	40,00	124,00
C5	7,29	7,11	7,10	7,11	355,58	0,93	10,94	7,27	7,31	7,60	7,13	40,07	124,00
D5	7,55	7,49	7,54	7,51	391,72	1,06	9,32	7,53	7,38	7,50	7,29	40,21	119,30
E5	7,64	7,36	7,43	7,37	412,23	1,01	10,60	7,67	7,56	7,47	7,62	40,25	124,00
F5	7,78	7,78	7,80	7,79	382,30	0,91	10,09	7,61	7,08	7,61	7,34	40,41	119,30
G5	7,77	7,03	7,58	7,05	383,69	1,05	9,88	7,72	7,51	7,39	6,94	40,54	124,00

Grupo 21 (60% Sint. + 40% Calc)		Res. Intrinseca ( $\sigma_0$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull <i>m</i>	Mod. Elasticidade médio E (Gpa)	C.V. (E) %	Tensão de Rup. ( $\sigma_r$ ) (Mpa)	C.V. ( $\sigma_r$ ) %
34 CPs	Total	31,57	22,90	9,13	9,6%	30,86	4,8%
19 CPs	Sup. Fixo	31,43	21,35	8,60	7,9%	30,69	4,8%
15 CPs	Sup. Articulado	31,80	21,19	9,81	6,0%	31,06	4,7%

Tabela c. 14 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 21

posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabi- lidade de Falha F(V)	ln[ln(1/(1-F(V)))]	posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabi- lidade de Falha F(V)	ln[ln(1/(1-F(V)))]	posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabi- lidade de Falha F(V)	ln[ln(1/(1-F(V)))]
1	27,92	3,33	1*/34	0,029	-3,541	1	27,92	3,33	1*/19	0,050	-2,970	1	28,61	3,35	1*/15	0,063	-2,740
2	28,49	3,35	2*/34	0,057	-2,833	2	28,49	3,35	2*/19	0,100	-2,250	2	28,75	3,36	2*/15	0,125	-2,013
3	28,61	3,35	3*/34	0,086	-2,412	3	28,80	3,36	3*/19	0,150	-1,817	3	29,97	3,40	3*/15	0,188	-1,572
4	28,75	3,36	4*/34	0,114	-2,109	4	28,98	3,37	4*/19	0,200	-1,500	4	29,99	3,40	4*/15	0,250	-1,246
5	28,80	3,36	5*/34	0,143	-1,870	5	29,11	3,37	5*/19	0,250	-1,246	5	30,38	3,41	5*/15	0,313	-0,982
6	28,98	3,37	6*/34	0,171	-1,671	6	30,26	3,41	6*/19	0,300	-1,031	6	30,53	3,42	6*/15	0,375	-0,755
7	29,11	3,37	7*/34	0,200	-1,500	7	30,49	3,42	7*/19	0,350	-0,842	7	30,78	3,43	7*/15	0,438	-0,553
8	29,97	3,40	8*/34	0,229	-1,349	8	30,64	3,42	8*/19	0,400	-0,672	8	30,93	3,43	8*/15	0,500	-0,367
9	29,99	3,40	9*/34	0,257	-1,213	9	30,70	3,42	9*/19	0,450	-0,514	9	31,35	3,45	9*/15	0,563	-0,190
10	30,26	3,41	10*/34	0,286	-1,089	10	30,72	3,42	10*/19	0,500	-0,367	10	31,42	3,45	10*/15	0,625	-0,019
11	30,38	3,41	11*/34	0,314	-0,975	11	30,81	3,43	11*/19	0,550	-0,225	11	31,52	3,45	11*/15	0,688	0,151
12	30,49	3,42	12*/34	0,343	-0,868	12	31,26	3,44	12*/19	0,600	-0,087	12	32,26	3,47	12*/15	0,750	0,327
13	30,53	3,42	13*/34	0,371	-0,767	13	31,30	3,44	13*/19	0,650	0,049	13	32,52	3,48	13*/15	0,813	0,515
14	30,64	3,42	14*/34	0,400	-0,672	14	31,36	3,45	14*/19	0,700	0,186	14	32,63	3,49	14*/15	0,875	0,732
15	30,70	3,42	15*/34	0,429	-0,581	15	31,45	3,45	15*/19	0,750	0,327	15	34,32	3,54	15*/15	0,938	1,020
16	30,72	3,42	16*/34	0,457	-0,493	16	31,79	3,46	16*/19	0,800	0,476						
17	30,78	3,43	17*/34	0,486	-0,408	17	33,00	3,50	17*/19	0,850	0,640						
18	30,81	3,43	18*/34	0,514	-0,326	18	33,04	3,50	18*/19	0,900	0,834						
19	30,93	3,43	19*/34	0,543	-0,245	19	33,08	3,50	19*/19	0,950	1,097						
20	31,26	3,44	20*/34	0,571	-0,166												
21	31,30	3,44	21*/34	0,600	-0,087												
22	31,35	3,45	22*/34	0,629	-0,010												
23	31,36	3,45	23*/34	0,657	0,068												
24	31,42	3,45	24*/34	0,686	0,146												
25	31,45	3,45	25*/34	0,714	0,225												
26	31,52	3,45	26*/34	0,743	0,306												
27	31,79	3,46	27*/34	0,771	0,389												
28	32,26	3,47	28*/34	0,800	0,476												
29	32,52	3,48	29*/34	0,829	0,567												
30	32,63	3,49	30*/34	0,857	0,666												
31	33,00	3,50	31*/34	0,886	0,774												
32	33,04	3,50	32*/34	0,914	0,899												
33	33,08	3,50	33*/34	0,943	1,052												
34	34,32	3,54	34*/34	0,971	1,268												

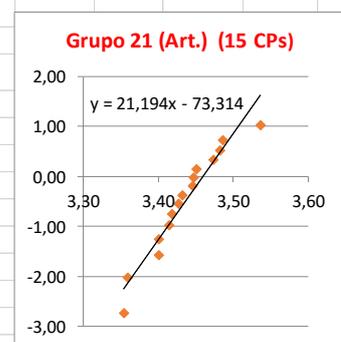
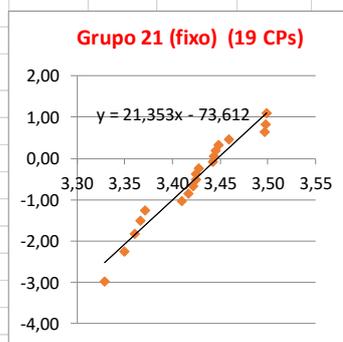
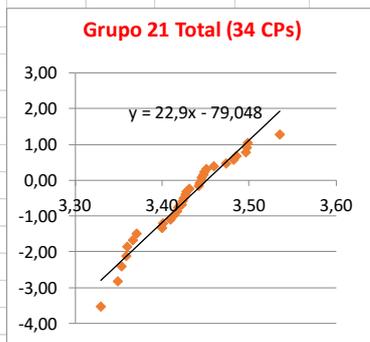


Tabela c. 15 - Dados dos CPs - Grupo 22

Grupo 22	espessura t (mm)				Força Ruptura (N)	Flecha (mm)	E (Gpa)	espessura t (mm)				w (mm)	Vão de ensaio (mm)
	1	2	3	4				5	6	7	8		
A1	6,72	7,34	6,71	7,33	330,72	1,23	8,25	6,88	7,36	8,36	8,38	39,48	124,00
B1	6,87	7,22	6,87	7,22	326,50	1,18	8,55	7,02	7,16	6,92	7,12	39,26	119,30
C1	7,32	7,28	7,32	7,28	345,80	1,23	8,87	7,38	7,28	7,18	7,16	39,06	124,00
D1	7,64	7,59	7,64	7,61	389,60	1,08	9,02	7,36	7,88	7,66	7,22	39,42	119,30
E1	7,69	8,38	7,71	8,38	407,60	1,10	8,68	8,00	8,66	7,78	7,66	39,24	124,00
F1	7,63	8,53	7,62	8,51	430,20	1,06	9,27	7,90	8,28	8,00	8,58	39,18	124,00
G1	7,57	7,99	7,58	7,97	416,10	1,11	8,13	8,14	8,14	7,78	8,10	39,18	119,30
A2	7,52	7,19	7,51	7,21	369,40	1,13	7,69	7,46	7,10	9,00	8,54	40,08	119,30
B2	6,89	6,81	6,88	6,81	308,30	1,25	7,79	6,98	6,76	7,26	7,22	39,98	119,30
C2	7,16	6,39	7,17	6,41	328,15	1,41	8,75	6,94	6,36	7,20	6,78	40,04	124,00
D2	6,76	5,99	6,77	6,01	267,70	1,42	7,77	7,00	6,64	6,88	6,38	40,14	124,00
E2	7,46	7,06	7,46	7,06	355,00	1,18	8,44	7,36	7,38	7,06	6,74	40,28	119,30
F2	7,26	6,71	7,25	6,72	351,00	1,32	8,35	6,62	6,80	7,36	7,42	39,88	119,30
G2	7,97	7,89	7,98	7,91	428,10	1,21	6,96	9,40	9,30	6,82	6,58	40,04	119,30
A3	7,32	6,52	7,33	6,51	302,47	1,26	8,29	6,38	6,10	8,74	8,18	39,38	124,00
B3	6,89	5,83	6,89	5,83	278,48	1,55	7,60	7,36	6,68	6,62	5,96	39,18	124,00
C3	7,94	7,21	7,94	7,22	375,20	1,17	8,03	8,04	7,46	7,42	6,78	39,22	119,30
D3	7,81	7,16	7,81	7,18	385,78	1,25	8,61	7,66	7,22	8,06	7,38	39,72	124,00
E3	7,71	7,46	7,72	7,46	385,70	1,15	8,53	7,58	7,18	7,72	7,26	39,28	119,30
F3	6,94	6,19	6,91	6,21	290,33	1,39	8,85	6,34	5,80	7,56	7,10	39,28	124,00
G3	6,65	6,25	6,65	6,25	269,54	1,34	7,47	8,14	7,90	6,34	5,70	39,24	124,00
A4	7,99	8,33	8,00	8,34	477,30	1,20	7,34	7,54	8,84	9,00	9,22	40,08	119,30
B4	7,55	7,78	7,56	7,79	393,40	1,20	8,94	7,52	7,10	7,62	7,86	39,98	124,00
C4	6,99	7,33	6,98	7,33	354,00	1,11	8,76	7,68	7,90	6,92	6,88	39,76	119,30
D4	6,99	7,28	6,98	7,29	350,80	1,19	7,91	7,24	7,54	7,66	7,86	39,98	119,30
E4	6,56	6,99	6,56	6,98	294,27	1,30	8,87	6,28	6,90	7,00	7,26	39,42	124,00
F4	6,89	7,35	6,88	7,34	357,80	1,30	7,83	7,82	8,18	6,22	6,48	39,62	119,30
G4	7,83	8,14	7,84	8,12	434,00	1,03	8,12	8,44	8,88	7,90	8,18	40,00	119,30
A5	7,51	7,08	7,52	7,09	371,20	1,12	8,31	7,64	7,18	8,08	7,86	39,94	119,30
B5	8,29	7,55	8,30	7,56	418,09	1,17	8,74	8,34	7,68	7,66	7,04	40,18	124,00
C5	7,81	7,39	7,81	7,39	364,13	1,14	8,93	7,18	7,00	8,10	7,82	40,08	124,00
D5	6,82	6,61	6,81	6,62	317,77	1,40	8,57	6,96	5,84	7,12	7,04	41,00	124,00
E5	6,01	6,24	6,00	6,23	290,00	1,34	8,22	7,48	7,44	6,00	5,90	40,14	119,30
F5	7,58	7,27	7,58	7,27	384,50	1,14	8,44	7,76	7,46	7,54	7,32	40,12	119,30
G5	7,27	6,86	7,28	6,87	335,20	1,10	7,82	7,86	7,76	7,60	7,36	40,62	119,30

Grupo 22 (70% Sint.+ 30% Calc)		Res. Intrínseca ( $\sigma_0$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull <i>m</i>	Mod. Elasticidade médio E (Gpa)	C.V. (E) %	Tensão de Rup. ( $\sigma_r$ ) (Mpa)	C.V. ( $\sigma_r$ ) %
35 CPs	Total	31,54	28,94	8,31	6,4%	30,98	3,6%
20 CPs	Sup. Fixo	31,49	25,49	8,16	6,1%	30,86	3,7%
15 CPs	Sup. Articulado	31,67	28,92	8,57	5,4%	31,01	3,3%

Tabela c. 16 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 22

posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabi- lidade de Falha F(V)	ln[ln[1/(1-F(V))]]	posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabi- lidade de Falha F(V)	ln[ln[1/(1-F(V))]]	posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabi- lidade de Falha F(V)	ln[ln[1/(1-F(V))]]
1	29,26	3,38	1/35	0,028	-3,569	1	29,45	3,38	1*/20	0,048	-3,020	1	29,26	3,38	1*/15	0,063	-2,740
2	29,45	3,38	2/35	0,056	-2,862	2	29,54	3,39	2*/20	0,095	-2,302	2	29,83	3,40	2*/15	0,125	-2,013
3	29,54	3,39	3/35	0,083	-2,442	3	29,80	3,39	3*/20	0,143	-1,870	3	29,85	3,40	3*/15	0,188	-1,572
4	29,80	3,39	4/35	0,111	-2,139	4	29,92	3,40	4*/20	0,190	-1,554	4	30,29	3,41	4*/15	0,250	-1,246
5	29,83	3,40	5/35	0,139	-1,900	5	29,93	3,40	5*/20	0,238	-1,302	5	30,43	3,42	5*/15	0,313	-0,982
6	29,85	3,40	6/35	0,167	-1,702	6	29,98	3,40	6*/20	0,286	-1,089	6	30,71	3,42	6*/15	0,375	-0,755
7	29,92	3,40	7/35	0,194	-1,531	7	30,35	3,41	7*/20	0,333	-0,903	7	30,82	3,43	7*/15	0,438	-0,553
8	29,93	3,40	8/35	0,222	-1,381	8	30,42	3,42	8*/20	0,381	-0,735	8	30,90	3,43	8*/15	0,500	-0,367
9	29,98	3,40	9/35	0,250	-1,246	9	30,45	3,42	9*/20	0,429	-0,581	9	31,36	3,45	9*/15	0,563	-0,190
10	30,29	3,41	10/35	0,278	-1,123	10	30,49	3,42	10*/20	0,476	-0,436	10	31,57	3,45	10*/15	0,625	-0,019
11	30,35	3,41	11/35	0,306	-1,009	11	30,54	3,42	11*/20	0,524	-0,298	11	31,95	3,46	11*/15	0,688	0,151
12	30,42	3,42	12/35	0,333	-0,903	12	30,84	3,43	12*/20	0,571	-0,166	12	31,97	3,46	12*/15	0,750	0,327
13	30,43	3,42	13/35	0,361	-0,803	13	31,08	3,44	13*/20	0,619	-0,036	13	32,16	3,47	13*/15	0,813	0,515
14	30,45	3,42	14/35	0,389	-0,708	14	31,11	3,44	14*/20	0,667	0,094	14	32,68	3,49	14*/15	0,875	0,732
15	30,49	3,42	15/35	0,417	-0,618	15	31,21	3,44	15*/20	0,714	0,225	15	33,11	3,50	15*/15	0,938	1,020
16	30,54	3,42	16/35	0,444	-0,531	16	31,44	3,45	16*/20	0,762	0,361						
17	30,71	3,42	17/35	0,472	-0,448	17	31,92	3,46	17*/20	0,810	0,506						
18	30,82	3,43	18/35	0,500	-0,367	18	31,97	3,46	18*/20	0,857	0,666						
19	30,84	3,43	19/35	0,528	-0,287	19	32,28	3,47	19*/20	0,905	0,855						
20	30,90	3,43	20/35	0,556	-0,210	20	34,52	3,54	20*/20	0,952	1,113						
21	31,08	3,44	21/35	0,583	-0,133												
22	31,11	3,44	22/35	0,611	-0,057												
23	31,21	3,44	23/35	0,639	0,018												
24	31,36	3,45	24/35	0,667	0,094												
25	31,44	3,45	25/35	0,694	0,170												
26	31,57	3,45	26/35	0,722	0,248												
27	31,92	3,46	27/35	0,750	0,327												
28	31,95	3,46	28/35	0,778	0,408												
29	31,97	3,46	29/35	0,806	0,493												
30	31,97	3,46	30/35	0,833	0,583												
31	32,16	3,47	31/35	0,861	0,680												
32	32,28	3,47	32/35	0,889	0,787												
33	32,68	3,49	33/35	0,917	0,910												
34	33,11	3,50	34/35	0,944	1,061												
35	34,52	3,54	35/35	0,972	1,276												

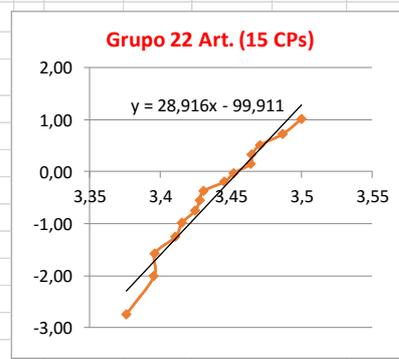
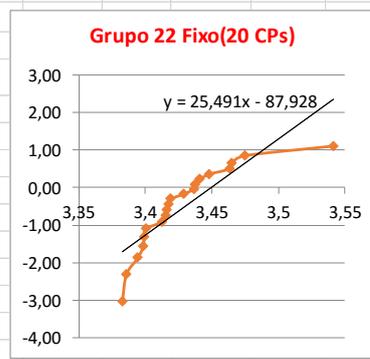
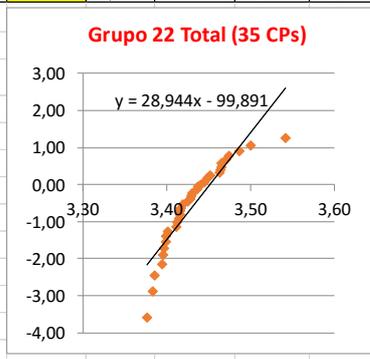


Tabela c. 17 - Dados dos CPs - Grupo 23

Grupo 23	espessura t (mm)				Força Ruptura (N)	Flecha (mm)	E (Gpa)	espessura t (mm)				w (mm)	Vão de ensaio (mm)
	1	2	3	4				5	6	7	8		
A1	6,76	7,38	6,76	7,38	362,96	1,26	8,88	6,78	7,14	7,74	8,42	39,34	123,50
B1	6,74	7,46	6,82	7,36	320,24	1,42	7,79	6,96	7,24	6,52	7,18	39,18	123,50
C1	7,62	7,52	7,62	7,52				7,54	7,38	7,04	7,38	39,98	123,50
D1	7,50	7,34	7,50	7,34	342,47	1,33	7,25	7,28	7,28	7,98	8,08	39,04	123,50
E1	7,14	8,18	7,14	8,18	382,20	1,33	7,73	7,14	7,88	7,48	8,06	39,12	123,50
F1	7,32	8,28	7,32	8,28	364,68	1,09	7,63	8,72	9,72	7,18	7,64	39,34	123,50
G1	7,42	8,34	7,42	8,34				8,56	9,44	7,04	7,56	39,18	123,50
A2	7,52	7,56	7,52	7,56	375,86	1,23	8,61	7,66	7,58	8,66	5,70	40,00	123,50
B2	7,50	7,34	7,58	7,32	369,00	1,28	8,49	7,04	6,94	7,72	7,88	39,12	123,50
C2	7,26	6,94	7,26	6,94	329,03	1,37	7,77	7,62	6,94	7,22	6,86	40,14	123,50
D2	7,62	7,10	7,62	7,08	384,80	1,46	7,62	7,82	7,52	7,58	6,96	40,12	123,50
E2	8,12	7,60	8,12	7,60	372,43	1,14	8,30	7,36	7,26	8,18	7,68	39,96	123,50
F2													123,50
G2	7,06	7,12	7,06	7,12	350,48	1,50	7,03	8,12	8,26	6,92	6,96	39,76	123,50
A3	7,70	7,92	7,70	7,92	426,55	1,46	6,98	6,98	7,32	9,08	8,96	39,26	123,50
B3	6,84	7,32	6,84	7,32	341,81	1,53	7,41	6,90	7,32	7,12	7,38	39,32	123,50
C3	7,38	7,92	7,38	7,92	381,11	1,34	7,70	7,54	8,02	7,16	7,72	39,16	123,50
D3	7,18	7,94	7,18	8,00	380,35	1,36	7,62	7,08	7,88	7,46	8,14	39,42	123,50
E3	6,80	7,86	6,80	7,86	364,00	1,40	7,87	6,72	7,58	7,14	8,06	39,28	123,50
F3	6,56	7,32	6,56	7,32	310,64	1,68	6,69	6,12	6,82	7,06	7,66	39,22	123,50
G3	6,78	7,40	6,78	7,40	297,00	1,27	7,33	8,06	8,62	6,26	6,88	39,18	123,50
A4	7,86	7,38	7,86	7,38	302,51	1,42	5,37	7,52	6,84	9,18	8,48	39,18	123,50
B4	7,14	6,96	7,16	6,96	303,18	1,41	7,60	6,86	6,56	7,32	6,82	39,30	123,50
C4	6,74	6,46	6,74	6,46	280,30	1,63	7,06	6,98	6,62	6,70	6,48	39,14	123,50
D4	7,14	6,94	7,20	6,94	282,09	1,31	7,59	6,96	6,78	7,02	6,78	39,44	123,50
E4	7,36	6,96	7,14	6,96	326,80	1,21	8,98	7,38	7,38	6,98	6,68	39,48	123,50
F4	7,52	7,26	7,52	7,26	368,77	1,34	9,12	6,38	5,98	7,46	7,52	39,38	123,50
G4	6,42	6,56	6,42	6,56	263,43	1,48	7,16	7,54	7,24	6,38	6,12	39,68	123,50
A5	7,40	6,98	7,40	6,98				7,56	7,52	7,88	7,52	39,84	123,50
B5	7,78	7,18	7,78	7,18				7,48	7,18	7,70	6,90	40,00	123,50
C5	6,92	6,50	6,92	6,50	335,59	1,43	8,88	6,10	6,26	7,78	7,18	40,12	123,50
D5	6,62	6,18	6,62	6,18	275,15	1,30	9,49	6,58	6,52	6,34	6,16	40,12	123,50
E5	7,04	7,14	7,04	7,14	337,60	1,32	8,94	6,86	6,84	6,92	6,62	40,08	123,50
F5	6,58	6,36	6,50	6,36	278,97	1,55	8,53	5,56	5,24	6,92	6,76	40,00	123,50
G5	5,86	5,08	5,86	5,08	197,38	1,67	7,97	6,18	5,86	5,56	5,14	40,24	123,50

Grupo 23 (80% Sint.+ 20% Calc)		Res. Intrínseca ( $\sigma_0$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull <i>m</i>	Mod.Elasticidade médio E (Gpa)	C.V. (E) %	Tensao de Rup. ( $\sigma_r$ ) (Mpa)	C.V. ( $\sigma_r$ ) %
34 CPs	Total	31,52	15,74	7,85	10,8%	30,52	6,8%

Tabela c. 18 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 23

posição	Res.Int. $\sigma_0$ (MPa)	$\ln \sigma$	10 CPs	Probabilidade de Falha F(V)	$\ln[\ln[1/(1-F(V))]]$
1	24,63	3,20	1*/30	0,032	-3,418
2	26,62	3,28	2*/30	0,065	-2,708
3	27,94	3,33	3*/30	0,097	-2,285
4	27,95	3,33	4*/30	0,129	-1,979
5	28,23	3,34	5*/30	0,161	-1,738
6	28,71	3,36	6*/30	0,194	-1,537
7	29,20	3,37	7*/30	0,226	-1,363
8	29,52	3,38	8*/30	0,258	-1,209
9	30,08	3,40	9*/30	0,290	-1,070
10	30,12	3,41	10*/30	0,323	-0,943
11	30,37	3,41	11*/30	0,355	-0,825
12	30,38	3,41	12*/30	0,387	-0,714
13	30,46	3,42	13*/30	0,419	-0,610
14	30,46	3,42	14*/30	0,452	-0,510
15	30,62	3,42	15*/30	0,484	-0,413
16	30,81	3,43	16*/30	0,516	-0,320
17	30,85	3,43	17*/30	0,548	-0,230
18	31,02	3,43	18*/30	0,581	-0,140
19	31,04	3,44	19*/30	0,613	-0,052
20	31,06	3,44	20*/30	0,645	0,035
21	31,15	3,44	21*/30	0,677	0,123
22	31,61	3,45	22*/30	0,710	0,212
23	31,77	3,46	23*/30	0,742	0,303
24	31,95	3,46	24*/30	0,774	0,397
25	32,13	3,47	25*/30	0,806	0,496
26	32,48	3,48	26*/30	0,839	0,601
27	32,84	3,49	27*/30	0,871	0,717
28	33,00	3,50	28*/30	0,903	0,848
29	34,19	3,53	29*/30	0,935	1,008
30	34,42	3,54	30*/30	0,968	1,234

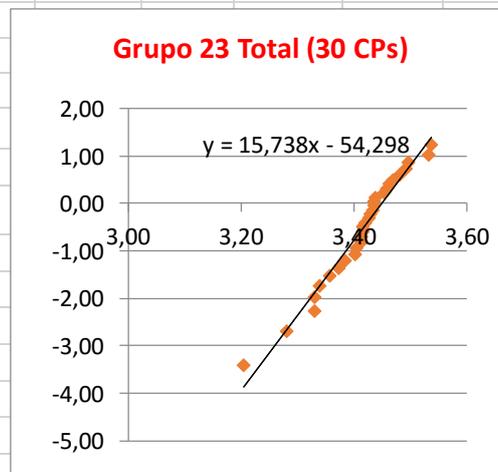


Tabela c. 19 - Dados dos CPs - Grupo 22

Grupo 24	espessura t (mm)				Força Ruptura (N)	Flecha (mm)	E (Gpa)	espessura t (mm)				w (mm)	Vão de ensaio (mm)
	1	2	3	4				5	6	7	8		
A1	6,36	6,86	6,36	6,96				6,72	7,22	9,06	9,46	39,52	
B1	7,04	6,50	7,00	6,50	310,40	1,65	6,27	6,88	6,18	7,42	7,10	39,62	119,30
C1	7,86	7,90	7,90	7,96	438,90	1,42	7,42	7,86	7,76	7,08	7,46	39,32	119,30
D1	7,56	7,54	7,56	7,54				7,58	7,20	6,86	6,32	39,40	
E1	7,10	7,60	7,16	7,66	337,10	1,23	7,70	6,76	7,62	7,28	7,30	39,06	119,30
F1	6,50	7,16	6,48	7,14	319,70	1,65	6,74	6,00	6,58	6,80	7,66	39,14	119,30
G1	6,60	7,26	6,62	7,32	320,50	1,40	5,57	8,62	9,44	6,86	7,02	39,12	119,30
A2	8,36	7,96	8,24	7,96	443,70	1,48	5,95	7,20	7,32	10,0	9,58	40,16	123,50
B2	7,00	6,78	7,00	6,72	310,30	1,60	6,68	6,20	5,92	7,36	7,34	39,86	119,30
C2	6,72	5,90	6,66	5,90	281,80	1,65	6,67	7,20	6,82	6,38	5,82	40,16	119,30
D2	7,94	7,08	7,94	7,08				7,86	6,98	8,00	7,42	39,96	
E2	8,10	7,60	8,04	7,56	420,30	1,39	7,11	7,36	7,32	8,30	7,40	39,96	119,30
F2	6,76	6,68	6,70	6,68	314,10	1,68	6,44	6,28	6,46	7,34	7,10	39,82	119,30
G2	6,34	6,54	6,34	6,48				8,88	8,88	6,68	6,54	39,90	
A3	7,60	7,94	7,60	7,80	414,10	1,57	6,34	6,60	6,90	9,30	9,36	39,18	123,50
B3	6,36	6,50	6,40	6,50	278,30	1,76	5,94	6,40	7,00	6,50	6,84	39,24	119,30
C3	7,22	7,90	7,30	7,86	394,40	1,50	7,08	7,40	8,16	6,54	7,10	39,06	119,30
D3	7,10	7,84	7,10	7,86	359,20	1,41	8,45	6,18	6,68	6,30	7,22	39,16	119,30
E3	6,56	7,64	6,56	7,64				6,42	5,94	7,44	6,84	39,08	
F3	7,26	6,72	7,38	6,76	294,30	1,50	6,52	7,48	7,12	6,60	6,02	39,22	119,30
G3	6,00	6,50	6,00	6,48	255,43	1,71	6,38	6,98	7,50	6,00	6,30	39,32	123,50
A4	7,02	7,36	7,00	7,36	358,30	1,73	5,88	6,70	7,10	8,24	8,50	39,54	123,50
B4	7,26	7,36	7,20	7,36	377,20	1,56	6,96	7,40	7,40	6,80	6,98	39,60	119,30
C4	7,64	7,46	7,64	7,46	367,20	1,68	7,57	6,40	6,60	6,78	7,00	39,96	123,50
D4	6,92	7,26	6,84	7,30	334,90	1,58	6,22	7,26	7,70	6,82	6,90	39,74	119,30
E4	7,18	7,46	7,20	7,38	369,60	1,56	7,45	6,18	6,40	7,20	7,56	39,48	119,30
F4	6,16	6,68	6,00	6,66	268,50	1,82	6,25	6,76	7,22	6,22	6,34	39,60	123,50
G4	7,50	8,14	7,60	8,20	430,00	1,45	6,09	8,84	9,46	6,88	7,46	39,50	119,30
A5	7,20	7,00	7,30	7,00	370,80	1,80	5,41	7,00	6,68	7,96	8,52	39,88	119,30
B5	7,30	6,78	7,26	6,84	336,60	1,55	6,63	7,40	6,88	7,18	6,64	40,00	119,30
C5	7,46	7,04	7,48	7,06	348,20	1,33	7,54	7,48	7,32	7,40	7,80	40,00	123,50
D5	7,20	7,00	7,16	6,90	341,90	1,66	7,16	5,70	5,90	7,40	7,16	40,16	119,13
E5	6,00	5,96	6,08	5,96	245,50	1,71	7,04	6,18	6,38	5,68	5,78	40,02	119,30
F5	6,50	6,40	6,54	6,44	298,20	1,87	7,39	6,30	6,06	6,30	6,38	40,04	123,50
G5	7,06	6,98	7,06	6,98	346,10	1,49	7,37	8,30	8,14	6,40	6,06	40,48	123,50

Grupo 24 (90% Sint. + 10% Calc)		Res. Intrinseca ( $\sigma_a$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull <i>m</i>	Mod. Elasticidade médio E (Gpa)	C.V. (E) %	Tensao de Rup. ( $\sigma_r$ ) (Mpa)	C.V. ( $\sigma_r$ ) %
30 CPs	Total	31,57	26,36	6,74	10,2%	30,95	4,1%
20 CPs	Sup. Fixo	31,32	24,19	6,72	10,6%	30,67	4,2%
10 CPs	Sup. Articulado	32,04	29,56	6,78	9,6%	31,51	3,1%

Tabela c. 20 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 24

posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabilidade de Falha F(V)	ln [ln(1/(1-F(V)))]	posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabilidade de Falha F(V)	ln [ln(1/(1-F(V)))]	posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabilidade de Falha F(V)	ln [ln(1/(1-F(V)))]
1	27,17	3,30	1*/30	0,032	-3,418	1	27,17	3,30	1*/20	0,048	-3,020	1	29,86	3,40	1*/10	0,091	-2,351
2	28,36	3,34	2*/30	0,065	-2,708	2	28,36	3,34	2*/20	0,095	-2,302	2	30,60	3,42	2*/10	0,182	-1,606
3	29,38	3,38	3*/30	0,097	-2,285	3	29,38	3,38	3*/20	0,143	-1,870	3	30,86	3,43	3*/10	0,273	-1,144
4	29,47	3,38	4*/30	0,129	-1,979	4	29,47	3,38	4*/20	0,190	-1,554	4	30,91	3,43	4*/10	0,364	-0,794
5	29,86	3,40	5*/30	0,161	-1,738	5	30,09	3,40	5*/20	0,238	-1,302	5	30,97	3,43	5*/10	0,455	-0,501
6	30,09	3,40	6*/30	0,194	-1,537	6	30,34	3,41	6*/20	0,286	-1,089	6	31,60	3,45	6*/10	0,545	-0,238
7	30,34	3,41	7*/30	0,226	-1,363	7	30,35	3,41	7*/20	0,333	-0,903	7	32,14	3,47	7*/10	0,636	0,012
8	30,35	3,41	8*/30	0,258	-1,209	8	30,49	3,42	8*/20	0,381	-0,735	8	32,52	3,48	8*/10	0,727	0,262
9	30,49	3,42	9*/30	0,290	-1,070	9	30,60	3,42	9*/20	0,429	-0,581	9	32,72	3,49	9*/10	0,818	0,533
10	30,60	3,42	10*/30	0,323	-0,943	10	30,68	3,42	10*/20	0,476	-0,436	10	32,96	3,50	10*/10	0,909	0,875
11	30,60	3,42	11*/30	0,355	-0,825	11	30,74	3,43	11*/20	0,524	-0,298						
12	30,68	3,42	12*/30	0,387	-0,714	12	31,39	3,45	12*/20	0,571	-0,166						
13	30,74	3,43	13*/30	0,419	-0,610	13	31,40	3,45	13*/20	0,619	-0,036						
14	30,86	3,43	14*/30	0,452	-0,510	14	31,43	3,45	14*/20	0,667	0,094						
15	30,91	3,43	15*/30	0,484	-0,413	15	31,53	3,45	15*/20	0,714	0,225						
16	30,97	3,43	16*/30	0,516	-0,320	16	31,53	3,45	16*/20	0,762	0,361						
17	31,39	3,45	17*/30	0,548	-0,230	17	31,69	3,46	17*/20	0,810	0,506						
18	31,40	3,45	18*/30	0,581	-0,140	18	31,97	3,46	18*/20	0,857	0,666						
19	31,43	3,45	19*/30	0,613	-0,052	19	32,03	3,47	19*/20	0,905	0,855						
20	31,53	3,45	20*/30	0,645	0,035	20	32,78	3,49	20*/20	0,952	1,113						
21	31,53	3,45	21*/30	0,677	0,123												
22	31,60	3,45	22*/30	0,710	0,212												
23	31,69	3,46	23*/30	0,742	0,303												
24	31,97	3,46	24*/30	0,774	0,397												
25	32,03	3,47	25*/30	0,806	0,496												
26	32,14	3,47	26*/30	0,839	0,601												
27	32,52	3,48	27*/30	0,871	0,717												
28	32,72	3,49	28*/30	0,903	0,848												
29	32,78	3,49	29*/30	0,935	1,008												
30	32,96	3,50	30*/30	0,968	1,234												

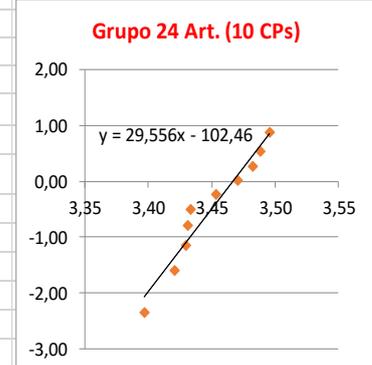
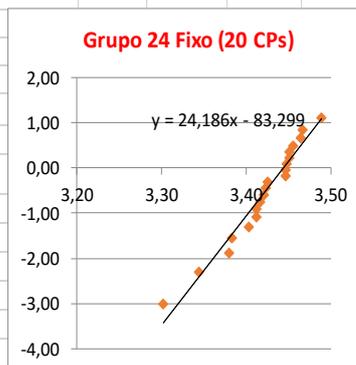
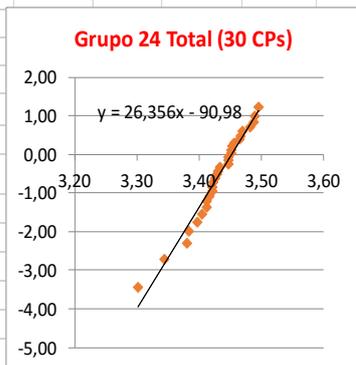


Tabela c. 21 - Dados dos CPs - Grupo 25

Grupo 25	espessura t (mm)				Força Ruptura (N)	Flecha (mm)	E (Gpa)	espessura t (mm)				w (mm)	Vão de ensaio (mm)
	1	2	3	4				5	6	7	8		
A1	8,08	8,53	8,09	8,51	434,30	0,66	13,66	7,40	8,12	8,92	9,28	39,22	124,00
B1	7,76	8,27	7,77	8,27	385,69	0,66	12,87	7,62	8,04	7,56	7,98	39,08	119,30
C1	8,22	8,33	8,21	8,34	435,57	0,68	12,75	8,04	8,12	7,92	8,10	39,12	119,30
D1	8,28	8,12	8,29	8,11	408,37	0,62	14,00	7,48	7,52	8,20	7,92	39,22	119,30
E1	7,48	7,67	7,48	7,66	348,20	0,77	13,29	6,70	7,52	7,52	7,50	39,36	124,00
F1	6,68	7,59	6,68	7,58	301,70	0,80	13,24	6,38	7,12	6,78	7,32	39,32	124,00
G1	7,27	7,96	7,28	7,94	376,90	0,75	13,13	8,94	9,42	6,34	6,86	39,16	124,00
A2													
B2	7,64	7,51	7,63	7,51	351,29	0,71	12,05	7,64	7,34	7,84	7,72	39,92	119,30
C2	8,35	7,79	8,34	7,81	407,70	0,65	15,04	8,58	8,06	7,52	6,88	40,08	124,00
D2	9,09	8,31	9,08	8,31	483,30	0,72	12,39	9,18	8,54	8,64	7,96	40,04	124,00
E2	9,08	8,28	9,08	8,31	463,40	0,57	14,19	7,90	7,64	9,10	8,36	40,04	119,30
F2	7,61	7,21	7,61	7,21	329,40	0,65	15,27	6,92	7,02	7,82	7,36	39,92	124,00
G2	8,04	7,88	8,05	7,86	403,00	0,64	14,31	9,48	9,24	7,02	6,94	40,00	124,00
A3	8,58	7,89	8,57	7,89	410,90	0,70	13,12	6,98	6,54	9,80	9,04	39,22	124,00
B3	7,65	6,71	7,65	6,73	339,70	0,73	15,86	7,42	6,88	7,18	6,46	39,32	124,00
C3	8,69	7,81	8,69	7,79	423,30	0,67	14,12	9,14	8,68	7,54	6,90	39,32	124,00
D3	9,54	8,87	9,51	8,88	525,80	0,60	13,87	9,50	8,88	9,26	8,72	39,38	124,00
E3	8,96	7,99	9,01	7,96	430,00	0,62	15,00	7,42	6,78	9,38	8,54	39,18	124,00
F3													
G3	7,88	7,31	7,88	7,30	359,30	0,68	13,22	8,88	8,82	6,52	5,98	39,08	119,30
A4	7,86	8,12	7,88	8,11	404,20	0,73	12,91	6,64	6,94	9,22	9,28	39,82	124,00
B4	7,15	7,16	7,15	7,15	326,00	0,73	13,26	7,06	7,28	6,96	7,02	39,68	119,30
C4	8,03	8,44	8,02	8,44	415,70	0,65	14,97	8,26	8,46	7,22	7,24	39,56	124,00
D4	8,22	8,64	8,21	8,65	434,18	0,60	13,18	8,12	8,64	8,34	8,46	39,52	119,30
E4	8,57	8,76	8,58	8,77	449,11	0,64	13,01	7,48	7,68	8,52	8,44	39,44	119,30
F4	7,36	7,81	7,37	7,82	308,80	0,65	11,78	7,28	7,76	7,48	7,56	39,44	119,30
G4	7,73	7,94	7,74	7,95	356,83	0,71	10,95	8,44	8,94	7,22	7,34	39,56	119,30
A5	7,35	6,71	7,36	6,72	287,60	0,77	13,58	5,84	5,44	8,08	7,66	39,98	124,00
B5	7,26	6,62	7,28	7,28	286,30	0,71	14,14	7,92	7,42	6,40	5,58	40,14	124,00
C5	8,97	8,43	8,99	8,43	474,60	0,62	15,01	8,78	8,70	8,02	7,34	40,18	124,00
D5	8,94	8,42	8,95	8,42	474,29	0,62	12,81	8,16	8,10	8,88	8,64	40,16	119,30
E5	8,23	8,01	8,23	8,02	412,53	0,61	14,06	7,54	7,52	8,18	7,98	40,28	119,30
F5	7,67	7,35	7,68	7,34	338,50	0,70	11,48	8,80	8,64	7,12	6,48	40,18	119,30
G5	7,96	7,66	7,96	7,66	362,18	0,67	13,52	6,86	6,66	7,70	7,38	40,38	119,30

Grupo 25 (Calcário 100%)		Res. Intrínseca ( $\sigma_0$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull <i>m</i>	Mod. Elasticidade médio E (Gpa)	C.V. (E) %	Tensão de Rup. ( $\sigma_r$ ) (Mpa)	C.V. ( $\sigma_r$ ) %
33 CPs	Total	28,92	22,09	13,52	8,1%	28,25	4,9%
15 CPs	Sup. Fixo	27,97	23,31	12,88	7,2%	27,38	4,1%
18 CPs	Sup. Articulado	29,56	25,37	14,05	6,7%	28,97	4,0%

Tabela c. 22 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 25

posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabilidade de Falha F(V)	ln[ln(1/(1-F(V)))]	posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabilidade de Falha F(V)	ln[ln(1/(1-F(V)))]	posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabilidade de Falha F(V)	ln[ln(1/(1-F(V)))]
1	24,32	3,19	1*/33	0,029	-3,511	1	24,32	3,19	1*/15	0,063	-2,740	1	26,24	3,27	1*/18	0,053	-2,918
2	26,24	3,27	2*/33	0,059	-2,803	2	26,26	3,27	2*/15	0,125	-2,013	2	27,04	3,30	2*/18	0,105	-2,196
3	26,26	3,27	3*/33	0,088	-2,382	3	26,31	3,27	3*/15	0,188	-1,572	3	27,95	3,33	3*/18	0,158	-1,761
4	26,31	3,27	4*/33	0,118	-2,078	4	26,73	3,29	4*/15	0,250	-1,246	4	28,05	3,33	4*/18	0,211	-1,442
5	26,73	3,29	5*/33	0,147	-1,838	5	27,11	3,30	5*/15	0,313	-0,982	5	28,39	3,35	5*/18	0,263	-1,186
6	27,04	3,30	6*/33	0,176	-1,639	6	27,44	3,31	6*/15	0,375	-0,755	6	28,70	3,36	6*/18	0,316	-0,969
7	27,11	3,30	7*/33	0,206	-1,467	7	27,46	3,31	7*/15	0,438	-0,553	7	28,75	3,36	7*/18	0,368	-0,778
8	27,44	3,31	8*/33	0,235	-1,316	8	27,47	3,31	8*/15	0,500	-0,367	8	28,84	3,36	8*/18	0,421	-0,604
9	27,46	3,31	9*/33	0,265	-1,179	9	27,66	3,32	9*/15	0,563	-0,190	9	28,99	3,37	9*/18	0,474	-0,443
10	27,47	3,31	10*/33	0,294	-1,055	10	27,71	3,32	10*/15	0,625	-0,019	10	29,03	3,37	10*/18	0,526	-0,291
11	27,66	3,32	11*/33	0,324	-0,939	11	27,78	3,32	11*/15	0,688	0,151	11	29,34	3,38	11*/18	0,579	-0,145
12	27,71	3,32	12*/33	0,353	-0,832	12	28,03	3,33	12*/15	0,750	0,327	12	29,46	3,38	12*/18	0,632	-0,001
13	27,78	3,32	13*/33	0,382	-0,730	13	28,54	3,35	13*/15	0,813	0,515	13	29,56	3,39	13*/18	0,684	0,142
14	27,95	3,33	14*/33	0,412	-0,634	14	28,74	3,36	14*/15	0,875	0,732	14	29,59	3,39	14*/18	0,737	0,289
15	28,03	3,33	15*/33	0,441	-0,541	15	29,10	3,37	15*/15	0,938	1,020	15	29,68	3,39	15*/18	0,789	0,443
16	28,05	3,33	16*/33	0,471	-0,453							16	29,88	3,40	16*/18	0,842	0,613
17	28,39	3,35	17*/33	0,500	-0,367							17	30,89	3,43	17*/18	0,895	0,812
18	28,54	3,35	18*/33	0,529	-0,283							18	31,13	3,44	18*/18	0,947	1,080
19	28,70	3,36	19*/33	0,559	-0,201												
20	28,74	3,36	20*/33	0,588	-0,120												
21	28,75	3,36	21*/33	0,618	-0,039												
22	28,84	3,36	22*/33	0,647	0,041												
23	28,99	3,37	23*/33	0,676	0,121												
24	29,03	3,37	24*/33	0,706	0,202												
25	29,10	3,37	25*/33	0,735	0,285												
26	29,34	3,38	26*/33	0,765	0,369												
27	29,46	3,38	27*/33	0,794	0,458												
28	29,56	3,39	28*/33	0,824	0,551												
29	29,59	3,39	29*/33	0,853	0,651												
30	29,68	3,39	30*/33	0,882	0,761												
31	29,88	3,40	31*/33	0,912	0,887												
32	30,89	3,43	32*/33	0,941	1,041												
33	31,13	3,44	33*/33	0,971	1,260												

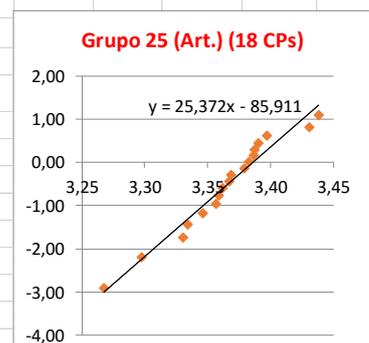
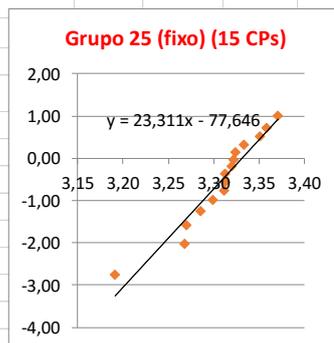
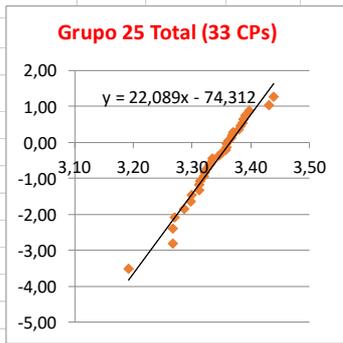


Tabela c. 23 - Dados dos CPs - Grupo 26

Grupo 26	espessura t (mm)				Força Ruptura (N)	Flecha (mm)	E (Gpa)	espessura t (mm)				w (mm)	Vão de ensaio (mm)
	1	2	3	4				5	6	7	8		
A1	7,22	7,72	7,22	7,72	370,40	0,75	11,32	6,82	7,48	8,88	9,16	39,22	119,30
B1	7,46	7,92	7,46	7,92	429,30	0,83	12,77	7,64	7,86	7,06	7,48	39,08	119,30
C1	8,12	8,06	8,12	8,08	455,60	0,74	14,03	8,68	8,28	7,68	7,82	39,28	124,00
D1	8,60	8,32	8,58	8,32	486,27	0,70	13,07	7,84	7,90	8,64	8,18	39,48	119,30
E1	7,40	7,84	7,36	7,82	417,73	0,83	11,97	7,20	7,94	7,96	7,84	39,42	119,30
F1	6,94	7,98	6,96	7,92	385,40	0,82	13,63	6,94	7,68	7,28	8,04	39,48	124,00
G1	7,74	8,40	7,66	8,44	492,10	0,80	13,33	9,24	9,88	7,14	7,52	39,14	124,00
A2	8,54	8,28	8,54	8,30	546,26	0,71	12,95	7,32	7,12	10,4	10,0	40,08	119,30
B2	7,48	7,26	7,50	7,24	357,12	0,83	11,38	7,64	7,44	7,34	7,14	39,92	119,30
C2	8,36	7,56	8,34	7,76	498,47	0,84	12,26	8,60	8,24	7,86	7,46	40,02	119,30
D2	8,98	8,56	8,98	8,56	525,17	0,70	11,89	9,00	8,62	8,94	8,22	40,00	119,30
E2	9,32	8,48	9,28	8,42	523,90	0,88	10,74	8,00	8,16	9,30	8,78	39,90	124,00
F2	7,48	6,96	7,42	7,00	372,30	0,84	12,76	6,46	6,20	8,16	7,80	39,98	119,30
G2	6,86	6,84	6,78	6,84	314,20	0,97	11,49	8,04	8,12	6,18	6,02	39,84	124,00
A3	7,82	7,04	7,82	7,04	371,20	0,79	11,79	7,58	7,20	9,58	8,82	39,08	124,00
B3	8,42	7,52	8,48	7,60	423,90	0,80	13,46	8,04	7,60	7,72	7,26	39,08	124,00
C3	8,84	7,98	8,78	8,00	500,70	0,80	12,95	9,06	8,56	8,22	7,42	39,46	124,00
D3	8,76	8,04	8,76	8,06	524,60	0,80	12,78	8,72	8,28	9,28	8,44	39,22	124,00
E3	8,64	7,98	8,66	8,00	500,60	0,77	14,18	7,78	7,52	8,92	8,32	39,24	124,00
F3													
G3	9,14	8,68	9,14	8,62	567,80	0,71	13,61	10,3	10,3	7,94	7,54	39,04	124,00
A4	8,96	9,02	8,96	9,04	535,38	0,75	11,33	7,82	7,96	10,4	10,6	39,82	124,00
B4	7,54	7,88	7,52	7,86	412,16	0,77	13,69	7,88	7,88	7,74	7,88	39,68	124,00
C4	8,18	8,60	8,18	8,62	515,00	0,67	14,22	8,46	8,74	7,90	7,96	39,64	119,30
D4	7,96	8,48	7,96	8,48	437,29	0,62	13,14	8,18	8,48	8,48	8,68	39,64	119,30
E4	7,68	8,14	7,72	8,24	457,52	0,72	13,83	7,16	7,62	8,22	8,56	39,42	119,30
F4	6,96	7,28	6,98	7,32	347,60	0,83	13,69	6,90	7,28	7,20	7,58	39,26	124,00
G4	7,66	8,52	7,80	8,34	372,30	0,84	8,50	9,48	10,1	6,98	7,26	39,40	119,30
A5	6,76	7,04	6,76	7,08	337,10	0,88	12,93	6,50	6,72	7,78	7,76	40,30	124,00
B5	7,56	7,88	7,52	7,78	402,90	0,75	15,06	7,62	7,76	6,64	7,30	40,18	124,00
C5	7,92	7,88	7,78	8,00	476,95	0,71	13,86	8,58	8,64	7,62	7,62	40,12	119,30
D5	8,66	8,92	8,66	8,92	543,38	0,67	13,34	8,18	8,12	8,78	8,78	40,18	119,30
E5	7,58	7,62	7,58	7,64	432,82	0,84	11,92	7,32	7,68	8,06	8,18	40,08	119,30
F5	7,08	7,72	7,08	7,68	363,40	0,76	13,82	6,94	7,86	7,38	7,76	40,10	124,00
G5	8,02	8,54	8,02	8,54	491,40	0,76	13,23	9,36	9,68	7,18	7,50	39,94	124,00

Grupo 26 (Rejeito 100%)		Res. Intrinseca ( $\sigma_a$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull m	Mod.Elasticidade médio E (Gpa)	C.V. (E) %	Tensao de Rup. ( $\sigma_r$ ) (Mpa)	C.V. ( $\sigma_r$ ) %
34 CPs	Total	33,17	16,61	12,79	9,7%	32,27	6,0%
16 CPs	Sup. Fixo	32,59	13,31	12,45	10,6%	31,77	7,1%
18 CPs	Sup. Articulado	33,60	21,21	13,10	8,2%	32,72	4,4%

Tabela c. 24 - - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 26

posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabi- lidade de Falha F(V)	ln[ln(1/(1-F(V)))]	posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabi- lidade de Falha F(V)	ln[ln(1/(1-F(V)))]	posição	Res.Int. σ <sub>0</sub> (MPa)	ln σ	posição relativa	Probabi- lidade de Falha F(V)	ln[ln(1/(1-F(V)))]
1	25,39	3,23	1*/34	0,029	-3,541	1	25,39	3,23	1*/16	0,059	-2,803	1	29,85	3,40	1*/18	0,053	-2,918
2	29,13	3,37	2*/34	0,057	-2,833	2	29,13	3,37	2*/16	0,118	-2,078	2	30,68	3,42	2*/18	0,105	-2,196
3	29,29	3,38	3*/34	0,086	-2,412	3	29,29	3,38	3*/16	0,176	-1,639	3	30,75	3,43	3*/18	0,158	-1,761
4	29,41	3,38	4*/34	0,114	-2,109	4	29,41	3,38	4*/16	0,235	-1,316	4	31,81	3,46	4*/18	0,211	-1,442
5	29,85	3,40	5*/34	0,143	-1,870	5	31,05	3,44	5*/16	0,294	-1,055	5	31,94	3,46	5*/18	0,263	-1,186
6	30,68	3,42	6*/34	0,171	-1,671	6	31,18	3,44	6*/16	0,353	-0,832	6	32,00	3,47	6*/18	0,316	-0,969
7	30,75	3,43	7*/34	0,200	-1,500	7	31,26	3,44	7*/16	0,412	-0,634	7	32,10	3,47	7*/18	0,368	-0,778
8	31,05	3,44	8*/34	0,229	-1,349	8	31,33	3,44	8*/16	0,471	-0,453	8	32,15	3,47	8*/18	0,421	-0,604
9	31,18	3,44	9*/34	0,257	-1,213	9	31,70	3,46	9*/16	0,529	-0,283	9	32,54	3,48	9*/18	0,474	-0,443
10	31,26	3,44	10*/34	0,286	-1,089	10	31,82	3,46	10*/16	0,588	-0,120	10	32,80	3,49	10*/18	0,526	-0,291
11	31,33	3,44	11*/34	0,314	-0,975	11	32,45	3,48	11*/16	0,647	0,041	11	32,92	3,49	11*/18	0,579	-0,145
12	31,70	3,46	12*/34	0,343	-0,868	12	32,72	3,49	12*/16	0,706	0,202	12	32,95	3,49	12*/18	0,632	-0,001
13	31,81	3,46	13*/34	0,371	-0,767	13	33,13	3,50	13*/16	0,765	0,369	13	34,01	3,53	13*/18	0,684	0,142
14	31,82	3,46	14*/34	0,400	-0,672	14	34,10	3,53	14*/16	0,824	0,551	14	34,07	3,53	14*/18	0,737	0,289
15	31,94	3,46	15*/34	0,429	-0,581	15	34,44	3,54	15*/16	0,882	0,761	15	34,30	3,54	15*/18	0,789	0,443
16	32,00	3,47	16*/34	0,457	-0,493	16	34,44	3,54	16*/16	0,941	1,041	16	35,11	3,56	16*/18	0,842	0,613
17	32,10	3,47	17*/34	0,486	-0,408							17	35,29	3,56	17*/18	0,895	0,812
18	32,15	3,47	18*/34	0,514	-0,326							18	35,47	3,57	18*/18	0,947	1,080
19	32,45	3,48	19*/34	0,543	-0,245												
20	32,54	3,48	20*/34	0,571	-0,166												
21	32,72	3,49	21*/34	0,600	-0,087												
22	32,80	3,49	22*/34	0,629	-0,010												
23	32,92	3,49	23*/34	0,657	0,068												
24	32,95	3,49	24*/34	0,686	0,146												
25	33,13	3,50	25*/34	0,714	0,225												
26	34,01	3,53	26*/34	0,743	0,306												
27	34,07	3,53	27*/34	0,771	0,389												
28	34,10	3,53	28*/34	0,800	0,476												
29	34,30	3,54	29*/34	0,829	0,567												
30	34,44	3,54	30*/34	0,857	0,666												
31	34,44	3,54	31*/34	0,886	0,774												
32	35,11	3,56	32*/34	0,914	0,899												
33	35,29	3,56	33*/34	0,943	1,052												
34	35,47	3,57	34*/34	0,971	1,268												

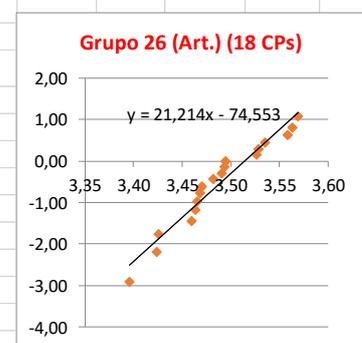
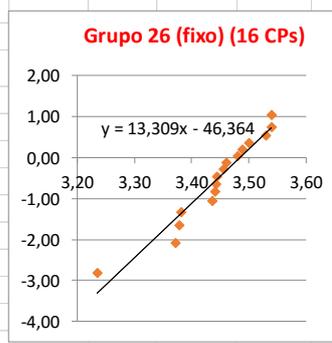
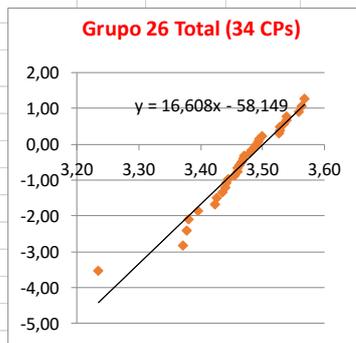


Tabela c. 25 - Dados dos CPs - Grupo 27

Grupo 27	espessura t (mm)				Força Ruptura (N)	Flecha (mm)	E (Gpa)	espessura t (mm)				w (mm)
	1	2	3	4				5	6	7	8	
A1	6,84	7,28	6,88	7,38	362,30	1,90	6,13	6,36	6,84	8,00	8,32	39,14
B1	6,88	7,28	6,84	7,28	352,70	1,91	6,96	6,56	6,94	6,38	6,82	38,98
C1	6,82	7,06	6,68	7,06	333,90	2,03	6,10	6,88	6,94	6,74	7,04	39,06
D1	7,16	7,34	7,16	7,28	372,10	1,96	6,48	6,94	7,28	6,78	6,72	39,32
E1	6,86	7,34	6,88	7,34	342,70	1,92	6,20	6,48	7,12	7,14	7,24	39,16
F1	6,40	7,06	6,40	7,06				6,72	7,34	6,38	6,78	39,14
G1	7,14	7,88	7,14	7,88				7,92	8,68	6,76	7,14	39,14
A2	6,96	6,78	6,96	6,82	313,50	1,82	5,82	6,80	6,62	7,82	7,78	39,98
B2	6,90	6,68	6,96	6,70	311,10	1,85	6,45	6,88	6,80	6,74	6,66	39,70
C2	7,54	7,12	7,50	7,12	391,19	1,85	6,67	7,78	7,32	6,88	6,62	39,92
D2	7,52	6,77	7,52	6,77	330,90	1,65	6,23	7,42	7,12	7,72	7,34	39,92
E2	7,38	6,84	7,42	6,84				6,34	6,40	7,62	6,98	39,84
F2	7,32	6,84	7,32	6,84	319,90	2,00	5,72	6,92	7,10	6,68	6,52	39,82
G2	6,82	6,72	6,82	6,72	302,40	1,90	5,96	6,94	7,08	6,92	6,72	39,70
A3	7,04	6,16	7,08	6,16	316,40	2,00	6,31	6,18	5,64	8,14	7,56	38,96
B3	6,76	5,90	6,76	5,90	262,20	2,05	6,23	6,88	6,28	6,42	5,56	38,98
C3	7,62	7,02	7,62	7,02				7,82	7,24	6,92	6,22	39,04
D3	8,14	7,42	8,14	7,42	417,60	1,61	6,66	8,38	7,72	7,88	7,26	39,18
E3	8,06	7,08	8,06	7,08	406,00	1,66	6,98	7,18	6,74	8,42	7,64	39,06
F3	7,26	6,80	7,26	6,80	341,80	1,89	6,76	6,62	6,38	7,24	6,74	39,04
G3	6,64	5,16	6,40	5,16	250,60	1,93	6,97	6,54	5,94	6,76	6,26	38,96
A4	7,78	7,96	7,80	8,02	422,00	1,60	6,56	6,66	6,78	8,84	8,96	39,60
B4	6,58	6,78	6,58	6,78	262,90	1,68	6,39	6,68	6,68	6,58	6,62	39,50
C4	7,24	7,58	7,24	7,52	374,90	1,73	6,78	7,66	8,02	6,48	6,56	39,36
D4	7,60	8,00	7,60	8,00	439,90	1,66	6,89	7,30	7,74	7,78	7,92	39,50
E4	6,84	7,12	6,82	7,10	315,30	1,72	6,68	6,12	6,38	7,36	7,76	39,18
F4	6,48	6,74	6,44	6,80	299,10	1,97	6,39	6,84	7,36	5,94	6,26	39,24
G4	7,74	8,48	7,78	8,48				8,64	9,38	6,94	7,50	39,24
A5	7,46	6,98	7,46	6,98	356,20	1,80	6,61	6,68	6,24	7,82	7,18	39,90
B5	7,32	6,42	7,32	6,40	316,50	1,80	6,11	7,54	7,14	7,74	6,10	40,06
C5	7,78	7,30	7,78	7,30	427,60	1,78	7,16	7,14	6,82	7,74	7,08	40,00
D5	6,64	5,74	6,62	5,78	271,10	2,20	5,53	6,54	6,52	6,90	6,60	40,18
E5	6,76	6,22	6,94	6,26	293,80	2,07	6,22	6,24	6,32	6,66	6,42	40,02
F5	6,52	6,40	6,56	6,32	293,00	1,97	6,81	6,42	6,22	6,40	6,14	40,24
G5	6,58	6,00	6,58	6,98	240,80	1,90	5,82	6,18	5,98	6,40	6,22	40,28

Grupo 27 (Sintético 100%)		Res. Intrínseca ( $\sigma_0$ ) (Mpa)	Mód. De Weibull $m$	Mod.Elasticidade médio E (Gpa)	C.V. (E) %	Tensão de Rup. ( $\sigma_r$ ) (Mpa)	C.V. ( $\sigma_r$ ) %
34 CPs	Total	33,14	16,99	6,42	6,4%	32,17	6,2%

Tabela c. 26 - Aplicação do método da posição relativa para encontrar o Módulo de Weibull. - Grupo 16

posição	Res.Int. $\sigma_0$ (MPa)	$\ln \sigma$	posição relativa	Probabi- lidade de Falha F(V)	$\ln[\ln[1/(1-F(V))]]$
1	26,04	3,26	1*/30	0,032	-3,418
2	27,74	3,32	2*/30	0,065	-2,708
3	29,81	3,39	3*/30	0,097	-2,285
4	30,20	3,41	4*/30	0,129	-1,979
5	30,81	3,43	5*/30	0,161	-1,738
6	30,81	3,43	6*/30	0,194	-1,537
7	30,91	3,43	7*/30	0,226	-1,363
8	31,18	3,44	8*/30	0,258	-1,209
9	31,22	3,44	9*/30	0,290	-1,070
10	31,43	3,45	10*/30	0,323	-0,943
11	31,84	3,46	11*/30	0,355	-0,825
12	31,85	3,46	12*/30	0,387	-0,714
13	31,88	3,46	13*/30	0,419	-0,610
14	32,24	3,47	14*/30	0,452	-0,510
15	32,40	3,48	15*/30	0,484	-0,413
16	32,40	3,48	16*/30	0,516	-0,320
17	32,55	3,48	17*/30	0,548	-0,230
18	32,70	3,49	18*/30	0,581	-0,140
19	32,75	3,49	19*/30	0,613	-0,052
20	32,95	3,50	20*/30	0,645	0,035
21	33,35	3,51	21*/30	0,677	0,123
22	33,63	3,52	22*/30	0,710	0,212
23	33,67	3,52	23*/30	0,742	0,303
24	33,74	3,52	24*/30	0,774	0,397
25	34,02	3,53	25*/30	0,806	0,496
26	34,05	3,53	26*/30	0,839	0,601
27	34,20	3,53	27*/30	0,871	0,717
28	34,57	3,54	28*/30	0,903	0,848
29	34,97	3,55	29*/30	0,935	1,008
30	35,08	3,56	30*/30	0,968	1,234

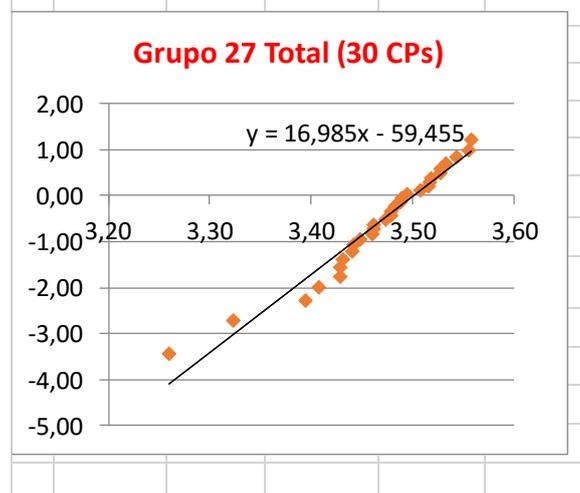


Tabela c. 27 - Dados dos CPs - Grupo 32

Grupo 32	espessura t (mm)				Força Ruptura (N)	Flecha max (mm)	Força Parcial (N)	Flecha (mm)	espessura t (mm)				w (mm)	Massa (g)
	1	2	3	4					5	6	7	8		
A1	7,63	7,62	7,62	7,62	454,51	1,89	200,30	0,64	7,35	7,80	9,05	9,35	39,02	79,00
B1	7,14	8,10	7,28	7,99	450,57	2,12	200,40	0,72	6,79	7,70	7,35	7,81	38,99	71,00
C1	7,36	7,22	7,35	7,25	334,39	1,65	200,60	0,84	7,86	7,15	6,76	7,57	39,07	69,00
D1	7,97	7,49	8,07	7,56	466,89	1,94	200,50	0,63	7,86	6,27	7,40	7,13	39,60	71,00
E1	7,01	6,98	7,42	7,40	398,29	1,84	200,00	0,73	7,35	7,94	7,74	6,65	39,37	71,00
F1	7,12	7,85	7,18	7,98	427,36	2,22	200,50	0,82	6,78	7,75	7,27	7,98	39,36	68,00
G1	7,07	7,63	7,55	7,67	417,84	2,08	200,40	0,73	8,07	9,11	6,70	7,91	39,24	79,00
A2	7,55	7,40	7,67	7,30	445,04	1,95	200,49	0,66	7,62	7,45	9,96	9,83	40,36	80,00
B2	7,49	7,70	7,47	7,41	432,46	2,18	200,70	0,74	7,44	7,10	7,59	7,48	39,95	72,00
C2	8,03	7,51	8,21	7,75	459,79	1,77	200,00	0,61	8,52	7,69	7,44	7,13	40,20	75,00
D2	8,49	7,43	8,27	7,50	458,54	1,62	200,60	0,55	8,61	7,19	8,69	7,68	40,04	77,00
E2	7,77	6,89	7,88	6,52	428,48	1,91	200,80	0,69	6,58	6,36	8,15	7,07	40,05	73,00
F2	7,05	7,03	7,42	7,11	366,06	2,24	200,50	0,92	7,49	7,26	6,77	6,63	39,91	68,00
G2	6,99	7,23	7,06	7,31	368,61	1,96	200,30	0,83	8,75	8,78	7,56	7,27	40,08	70,00
A3	7,91	7,19	7,78	7,32	458,34	1,84	200,50	0,62	8,15	7,53	9,16	9,05	39,21	79,00
B3	8,77	7,67	8,45	7,73	530,59	1,89	200,20	0,52	7,73	7,70	8,11	7,15	39,19	78,00
C3	7,05	7,26	7,57	7,04	409,28	2,12	200,50	0,80	7,94	7,90	7,53	7,62	39,56	73,00
D3	7,90	6,61	7,90	6,75	428,89	1,64	200,90	0,59	8,89	7,56	8,32	8,04	39,37	78,00
E3	7,42	6,93	7,64	6,70	394,30	1,70	200,20	0,68	7,15	6,85	9,18	7,82	39,58	72,00
F3	7,32	7,66	7,67	7,41	394,30	1,82	200,40	0,72	6,99	7,21	7,36	6,88	39,65	71,00
G3	7,45	6,71	7,57	6,65	354,00	2,10	200,10	0,92	8,76	9,22	7,20	7,34	39,10	69,00
A4	6,71	7,25	6,94	7,33	391,09	2,05	200,60	0,82	7,46	7,54	6,93	7,87	39,91	69,00
B4	7,63	8,28	7,63	8,39	496,50	1,99	200,60	0,59	7,21	7,39	7,56	7,70	39,42	75,00
C4	7,56	8,15	7,84	7,55	443,26	1,68	200,20	0,58	7,19	7,83	6,65	7,50	39,56	76,00
D4	7,42	8,17	7,46	8,37	501,49	1,85	200,90	0,56	6,95	7,95	7,33	7,69	39,63	74,00
E4	6,81	7,29	6,97	7,21	396,57	1,96	200,60	0,76	7,15	7,49	6,99	7,89	39,41	68,00
F4	7,31	7,60	7,44	7,73	419,77	1,82	200,60	0,68	7,16	7,35	6,90	8,29	39,23	75,00
G4	7,05	7,17	7,13	7,60	396,72	2,20	200,20	0,83	7,49	8,13	7,20	7,26	39,41	68,00
A5														
B5														
C5														
D5														
E5														
F5	7,12	7,22	7,22	6,98	395,56	2,06	200,70	0,78	7,60	7,41	8,14	7,72	40,33	74,00
G5	7,61	7,83	7,77	7,90	462,61	1,80	200,20	0,61	8,31	8,79	7,53	7,60	40,40	80,00

## ANEXO D - DADOS OBTIDOS POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Tabela d 28 -Resultado obtido de análise por Simulação Numérica em comparação aos resultado obtidos por Método Analítico - Grupo 16

Grupo16	E Ansys (GPa)	Flecha Ansys	Tensao Ansys
A1	13,64	0,65	30,05
B1	13,22	0,67	29,16
C1	12,42	0,70	30,76
D1	14,97	0,59	29,32
E1	13,26	0,65	28,18
F1	13,60	0,67	27,55
G1	13,59	0,71	28,99
A2	10,86	0,73	28,79
B2	14,83	0,62	28,85
C2	13,97	0,63	30,61
D2	10,19	0,78	28,72
E2	14,48	0,63	29,47
F2	11,08	0,68	25,11
G2	11,04	0,77	28,11
A3	13,68	0,69	29,21
B3	14,28	0,74	30,98
C3	9,27	0,94	26,69
D3	14,44	0,62	28,64
E3	15,53	0,61	30,23
F3	12,42	0,78	27,99
G3	13,59	0,64	28,33
A4	10,87	0,78	29,20
B4	10,90	0,82	29,03
C4	13,02	0,68	28,67
D4	11,84	0,68	26,86
E4	14,69	0,70	37,25
F4	11,33	0,74	27,12
G4	9,60	0,82	28,27
A5	10,43	0,81	29,03
B5	9,77	0,86	25,98
C5	14,31	0,73	29,96
D5	15,48	0,69	31,54
E5	14,43	0,72	30,75
F5	16,30	0,60	29,37
G5	13,54	0,67	29,24
<b>Media Total</b>	<b>13,54</b>	<b>0,69</b>	<b>29,03</b>
Desvio Padrão	1,869	0,079	1,962
<b>CV</b>	<b>13,80%</b>	<b>11,40%</b>	<b>6,76%</b>
<b>Suporte Fixo</b>	<b>11,21</b>	<b>0,72</b>	<b>28,70</b>
Desvio Padrão	1,565	0,081	2,378
<b>CV</b>	<b>13,96%</b>	<b>11,28%</b>	<b>8,29%</b>
<b>Suporte Articulado</b>	<b>14,43</b>	<b>0,67</b>	<b>29,37</b>
Desvio Padrão	0,928	0,056	1,052
<b>CV</b>	<b>6,43%</b>	<b>8,39%</b>	<b>3,58%</b>

Tabela d. 29 - Resultado obtido de análise por Simulação Numérica em comparação aos resultado obtidos por Método Analítico - Grupo 17

Grupo 17	E Ansys (GPa)	Flecha Ansys (mm)	Tensao Ansys (MPa)
A1	12,23	0,74	29,84
B1	13,50	0,80	30,97
C1	11,62	0,83	33,58
D1	12,05	0,84	31,04
E1	12,28	0,91	31,45
F1			
G1	13,38	0,72	31,64
A2	11,93	0,82	30,56
B2	10,90	0,85	29,23
C2	11,32	0,90	29,12
D2	8,20	1,15	25,70
E2	10,56	0,98	29,36
F2	12,45	0,80	27,60
G2	9,98	0,98	33,84
A3	9,51	0,77	24,37
B3	12,73	0,78	29,43
C3	9,38	0,99	30,87
D3	12,32	0,83	32,20
E3	9,33	0,93	28,58
F3			
G3	12,90	0,69	28,72
A4			
B4	10,54	0,96	28,57
C4	12,47	0,81	29,60
D4	11,42	0,83	30,27
E4	11,61	0,78	28,71
F4	12,09	0,87	30,14
G4	10,78	0,83	27,85
A5	10,31	0,92	29,68
B5	13,66	0,80	30,87
C5			
D5	11,98	0,72	28,74
E5	9,26	0,96	29,59
F5	13,61	0,72	29,36
G5	11,82	0,74	30,62
<b>Media Total</b>	<b>11,82</b>	<b>0,83</b>	<b>29,60</b>
Desvio Padrão	1,397	0,101	1,901
<b>CV</b>	<b>11,82%</b>	<b>12,12%</b>	<b>6,42%</b>
<b>Suporte Fixo</b>	<b>11,32</b>	<b>0,84</b>	<b>29,59</b>
Desvio Padrão	1,366	0,105	1,985
<b>CV</b>	<b>12,06%</b>	<b>12,44%</b>	<b>6,71%</b>
<b>Suporte Articulado</b>	<b>12,59</b>	<b>0,80</b>	<b>30,77</b>
Desvio Padrão	0,515	0,063	1,491
<b>CV</b>	<b>4,09%</b>	<b>7,90%</b>	<b>4,85%</b>

Tabela d. 30 - Resultado obtido de análise por Simulação Numérica em comparação aos resultado obtidos por Método Analítico - Grupo 18

Grupo 18	E Ansys (GPa)	Flecha Ansys (mm)	Tensao Ansys (MPa)
A1	11,75	0,80	31,06
B1	11,21	0,87	28,62
C1	11,90	0,85	30,03
D1			
E1	11,93	0,80	28,26
F1			
G1			
A2	11,31	0,84	31,16
B2			
C2			
D2	11,69	0,82	30,76
E2	12,50	0,84	31,92
F2	11,46	0,83	27,16
G2	10,72	0,81	30,31
A3	11,22	0,90	31,19
B3	10,63	0,97	28,20
C3	12,29	0,86	31,34
D3	12,49	0,80	30,61
E3	12,80	0,77	26,94
F3	11,93	0,92	30,70
G3	10,57	0,90	31,28
A4	10,56	1,00	31,19
B4	10,45	0,95	28,26
C4	10,83	0,93	30,79
D4	10,32	0,85	30,88
E4	11,99	0,75	28,86
F4	10,65	0,90	28,73
G4	11,21	0,82	32,07
A5	10,85	0,87	29,60
B5	11,52	0,87	31,07
C5	11,35	0,84	30,55
D5	12,84	0,83	30,93
E5	9,99	1,08	28,31
F5	11,70	0,77	24,49
G5	11,87	0,90	30,49
<b>Media Total</b>	<b>11,41</b>	<b>0,85</b>	<b>30,58</b>
Desvio Padrão	0,747	0,071	1,698
<b>CV</b>	<b>6,55%</b>	<b>8,34%</b>	<b>5,55%</b>

