

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL - GUARAPUAVA
ENGENHARIA CIVIL**

ADAM CEBULSKI UTRI

**ESTUDO DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE COMPOSTO
PLÁSTICO RECICLADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2021

ADAM CEBULSKI UTRI

**ESTUDO DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE COMPOSTO
PLÁSTICO RECICLADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Coordenação de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Dyorgge Alves Silva

GUARAPUAVA

2021

ATA DA DEFESA

Realizou-se no dia **20 de maio de 2021**, às **16 h 00 min**, via Google Meet, a defesa de trabalho de conclusão como requisito para a aprovação do aluno **Adam Cebulski Utri**, na disciplina de trabalho de conclusão de curso 2, de engenharia civil, intitulado: **ESTUDO DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE COMPOSTO PLÁSTICO RECICLADO**.

A banca foi composta pelo Presidente:

Dyorgge Alves Silva, e pelos seguintes membros:

Marcela Maier Farias Czap

Rodrigo Scoczynski Ribeiro

Guarapuava, 20 de maio de 2021

Dedico este trabalho a minha família e amigos, também aos professores e servidores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná por toda a estrutura e apoio por mim recebidos.

AGRADECIMENTOS

É inviável a descrição de todas as pessoas nas quais tive o prazer de interagir, tais pessoas foram cruciais para o meu crescimento como ser humano e meu desenvolvimento como aluno e futuro engenheiro.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dyorgge Alves Silva, por todo o suporte técnico a mim fornecido, e a Universidade Tecnológica federal do Paraná pela disponibilização da estrutura, equipamentos e suporte financeiro para aquisição de amostras e demais custos envolvidos.

Aos meus colegas de sala.

E em especial um agradecimento a minha família, por toda a educação e suporte emocional que recebi. Saliento também a influência direta da minha família para a escolha deste tema, que com trabalho duro e criatividade inovaram o processo de reciclagem e desenvolveram um produto com enorme potencial de impacto social.

“Você não é derrotado quando perde, somente quando desiste.”

(ALI, Muhammad)

RESUMO

UTRI, Adam. **Estudo de propriedades fisico-mecanicas de composto plástico reciclado**. 2020. 43 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2020.

Os resíduos plásticos estão entre os maiores poluentes da atualidade e mesmo com a existência da tecnologia de reciclagem de plástico a maior parte deste material é descartada como lixo, principalmente pela baixa atratividade e pouco investimento em indústrias desta natureza. O presente estudo visa utilizar matéria prima reciclada, com base em uma mistura de materiais plásticos, anteriormente ditos como não recicláveis, como um material alternativo para uso na construção civil. Para isto, foram realizados estudos sobre as principais variáveis atuantes em uma estrutura. Dentre as diversas propriedades estudadas deste material, revelou-se um potencial para a sua aplicação em estruturas de pequeno porte, sendo necessários estudos mais aprofundados quanto a sua viabilidade econômica frente a outros materiais, análise de ciclo de vida, resistência química, biológica e intemperismo.

Palavras-chave: Reciclagem. Inovação. Engenharia Civil. Plásticos. Materiais alternativos.

ABSTRACT

UTRI, Adam. **Study of physico-mechanical properties of recycled plastic compound**. 2020. 43 pages. Work of Conclusion Course in Civil Engineering - Federal University of Technology - Paraná. Guarapuava, 2020.

Plastic waste is among the biggest pollutants today and even with the existence of plastic recycling technology, most of this material is discarded as garbage, mainly due to its low attractiveness and little investment in industries of this nature. The present study aims to use recycled raw material, based on a mixture of plastic materials, previously said to be non-recyclable, as an alternative material for use in civil construction. For this, studies will be carried out on the main variables acting on a structure. Among the various properties studied of this material, it proved to be a potential for its application in small structures, and further studies are needed regarding its economic viability, life cycle analysis, chemical, biological and weathering resistance.

Keywords: Recycling. Innovation. Civil Engineering. Plastics. Alternative materials.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Produtos em composto plástico reciclado	18
Figura 2 - Matéria prima confecção amostras	21
Figura 3 - Máquina de Teste Ensaio Compressão.....	22
Figura 4 - Amostra ensaio compressão	23
Figura 5 - Maquinário para ensaio a compressão.....	23
Figura 6 - Ensaio Flexão Três Pontos	24
Figura 7 - Amostras ensaio flexão	25
Figura 8 - Maquinário ensaio flexão.....	25
Figura 9 - Ensaio Tração Direta.....	26
Figura 10 - Ensaio Tração Indireta	27
Figura 11 - Maquinário ensaio Tração Direta	27
Figura 12 - Maquinário ensaio Tração Indireta	27
Figura 13 - Resultados Ensaio Compressão	28
Figura 14 - Amostra deformada ensaio compressão (a).....	29
Figura 15 - Amostra deformada ensaio compressão (b).....	30
Figura 16 - Resultados Compressão Amostras Envelhecidas.....	31
Figura 17 - Linha do tempo padrão de deformação a compressão	31
Figura 18 - Resultados Flexão em Três Pontos	32
Figura 19 - Amostra rompida ensaio flexão 3 pontos	33
Figura 20 - Resultados tração indireta.....	34
Figura 21 - Conversão ensaio tração indireta.....	35
Figura 22 - Amostra rompida ensaio tração indireta.....	36
Figura 23 - Pergolado padrão Replastik	39
Figura 24 - Ligação em mão francesa metálica	40
Figura 25 - Instalação de balanço em pergolado.....	40
Figura 26 - Trapiche e deck.....	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 SITUAÇÃO SOCIOECONÔMICA ATUAL DA RECICLAGEM DE PLÁSTICOS	13
1.2 SISTEMA CONVENCIONAL DE RECICLAGEM DE PLÁSTICOS	14
1.3 SISTEMA DE RECICLAGEM NÃO CONVENCIONAL.....	17
2 OBJETIVOS	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	20
3.2 ENSAIO COMPRESSÃO	22
3.3 ENSAIO FLEXÃO	24
3.4 ENSAIO TRAÇÃO	26
4 DESENVOLVIMENTO.....	28
4.1 RESULTADOS COMPRESSÃO	28
4.1.1 Compressão de amostras frescas	28
4.1.2 Compressão de amostras envelhecidas.....	30
4.2 RESULTADOS FLEXÃO	32
4.3 RESULTADOS TRAÇÃO	34
4.4 ANÁLISE DE RESULTADOS DOS ENSAIOS	36
4.5 MÉTODO CONSTRUTIVO EMPREGADO	38
5 CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

Uma das atuações mais importantes de um engenheiro é o cálculo estrutural, onde por muito tempo a madeira e a pedra foram os materiais preferidos para execução de estruturas, e com o tempo, novas tecnologias e novos materiais foram surgindo, como por exemplo, o concreto e o aço. Cada material apresenta suas vantagens e desvantagens, e com isso a escolha do material ideal varia para cada situação. Dentre as diversas variáveis para a escolha do material, existem os custos relacionados a aquisição da matéria prima, sua trabalhabilidade, sua manutenção, acabamento, disponibilidade de mão de obra qualificada, entre outros (PARENTE, 2006). Por isso para qualquer profissional da área, é de grande importância sempre manter-se informado e aberto à novos materiais e sistemas construtivos.

1.1 SITUAÇÃO SOCIOECONÔMICA ATUAL DA RECICLAGEM DE PLÁSTICOS

Os resíduos plásticos estão entre os maiores poluentes da atualidade, e de acordo com o Relatório da organização governamental Fundo Mundial para a Natureza (WWF,2019), o Brasil é o quarto maior país produtor de lixo plástico do mundo (11,4 milhões de toneladas/ano), e mesmo com a existência da tecnologia de reciclagem de plástico a maior parte deste material é descartada como lixo, principalmente pela baixa atratividade em investimento em indústrias desta natureza. Segundo este mesmo relatório, essa baixa atratividade é devida principalmente ao custo da coleta seletiva que abate grande parte da margem de lucro. Outra estimativa presente no relatório é de que caso não haja uma mudança significativa no mercado de reciclagem de plásticos, a quantidade de poluição por lixo plástico dobre até 2030 (WWF, 2019).

Desde a primeira Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1972, este assunto passou a ter cada vez mais importância, e o apelo pela sustentabilidade se tornou cada vez mais forte dentro da sociedade. Com o tempo, empresas começaram a investir na aplicação de materiais reciclados, para satisfazer uma demanda de nicho de certa parcela da população que está cada vez mais disposta em gastar mais em um produto pelo simples fato de ter origem reciclada

(ONU, 2019). A mudança de atitude do consumidor em priorizar empresas que utilizem matéria prima reciclada, quando exercida por parcelas maiores da sociedade, torna o mercado da reciclagem mais atrativo para investimentos, o que poderia reverter a atual situação dos resíduos plásticos no mundo todo. Mas atualmente, enquanto este tipo de postura sustentável ainda é aplicado apenas em pequenos nichos de consumidores, a melhor forma de tornar a reciclagem um investimento mais atrativo é melhorando e inovando em seu processo.

1.2 SISTEMA CONVENCIONAL DE RECICLAGEM DE PLÁSTICOS

O sistema convencional de reciclagem pode ser descrito em seis etapas, sendo elas: Coleta, Separação, Moagem, Lavagem, Aglutinação e Extrusão. Mesmo podendo existir pequenas variações dentro de tais etapas, em geral a maior parte da produção de matéria prima reciclada mundial pode ser descrita por estes passos.

A coleta é a etapa inicial do processo, a forma em que ela é feita afeta diretamente a qualidade final do produto. Nesta etapa o consumidor tem grande influência, pois a separação adequada dos resíduos permite uma melhor execução de todas as demais etapas. Tal fase é bastante negligenciada, pois depende do comportamento comunitário da sociedade, onde poucos dejetos mal selecionados podem contaminar uma grande quantidade de material puro. Esta etapa também gera uma grande quantidade de empregos para os catadores de material reciclado, que segundo o Instituto de pesquisas econômicas aplicadas são responsáveis pela coleta de cerca de 90% de todo o lixo reciclado do Brasil (IPEA,2013).

A separação é um processo que ocorre normalmente dentro da indústria, ou em centros e associações dos catadores de lixo reciclável, nela ocorre um refinamento do material coletado, normalmente com a separação da matéria prima nas categorias de PET (tereftalato de polietileno), PEAD (polietileno de alta densidade), PVC (Policloreto de Vinila), PEBD (Polietileno de baixa densidade), PP (Polipropileno), PS (poliestireno), entre outros. Quando é necessário um maior controle de qualidade também ocorre uma separação mais refinada com relação a limpeza da matéria prima, cor, presença ou ausência de rótulos e tinturas.

Na etapa da moagem, o material já selecionado é moído até uma granulometria exequível ao maquinário das próximas etapas, onde os grânulos do material processado não dispõem de mais de dois centímetros na sua maior dimensão.

A etapa seguinte é a lavagem e secagem do material, que até então apresenta elevada quantidade de matéria orgânica e impurezas, nesta etapa também ocorre uma segunda seleção do material, pois a grande maioria dos materiais plásticos recicláveis são menos densos que a água e com isso, por meio da decantação são separados de quaisquer impurezas com densidades superiores à da água.

A aglutinação é bastante semelhante à moagem, mas acontece de forma mais intensa e sobre rotações mais elevadas. O maquinário utilizado nesta etapa se assemelha bastante a um liquidificador, mas em escala industrial, onde suas lâminas trituram repetidamente o material, e por meio de fricção elevam a sua temperatura evaporando boa parte da umidade remanescente do processo de lavagem e volatilizando alguns compostos orgânicos ainda presentes no material.

Uma das etapas finais é a extrusão, que por meio de resistências elétricas fundem o material, até uma textura pastosa, e com a utilização de uma rosca contínua o material fundido é extrusado através de pequenas aberturas refrigeradas, solidificando o material em formato de fios uniformes e contínuos, que por fim são picotados energicamente por um maquinário de corte, o que transforma tais fios em grânulos.

Por fim, os grânulos já podem ser revendidos para outras indústrias utilizá-los como matéria prima de novo produtos, assim iniciando novamente o ciclo. O grânulo de plástico reciclado possui uma homogeneidade e pureza menor se comparada à matéria prima virgem, e por isso normalmente o material reciclado é misturado com o material virgem a fim de melhorar as propriedades mecânicas e estéticas do produto final.

Segundo o estudo de viabilidade econômica de um empreendimento para reciclagem de garrafas pet na cidade de Uberlândia/MG, o sistema convencional de reciclagem estudado possui um custo inicial de investimento relativamente, tem altos custos relacionados à eletricidade e funcionários, e ainda sofre com concorrência de indústrias de reciclagem de grande porte, onde fora concluído a necessidade de inovação no processo de reciclagem (MARQUES NUNES; RÚBIA DA SILVA; COBIANCHI

NIGRO, 2007). Como dito anteriormente, a qualidade, homogeneidade e trabalhabilidade do material reciclado é normalmente inferior à matéria prima virgem, diminuindo o interesse de outras indústrias na aquisição deste tipo de matéria prima.

1.3 SISTEMA DE RECICLAGEM NÃO CONVENCIONAL

Na cidade de Guarapuava-PR, um empresário que anteriormente trabalhava com o processo convencional de reciclagem começou a procurar formas de aproveitar os rejeitos do processo da reciclagem convencional, sendo eles materiais plásticos com excesso de impurezas (sujeira, rótulos, tinta, óleos...). Para solucionar este problema, a empresa criou uma máquina específica para materiais de menor pureza, onde o material é injetado em um molde e então resfriado. Com esta menor exigência de qualidade da matéria prima, foi possível reduzir consideravelmente custos com a aquisição do material, que atualmente é quase que exclusivamente advindo de doações.

Além da redução drástica no custo de operação, a empresa, que antes vendia grânulos plásticos para outras empresas passou a produzir produtos finalizados, o que novamente agregou na margem de lucro do negócio, tornando-o mais viável. Devido às limitações deste composto plástico reciclado, principalmente em relação a pureza e nobreza da sua matéria prima, os produtos finais deste processo provem de um acabamento mais rústico e rugoso. Assim, em função da praticidade de execução e com as limitações do material em vista, foram feitos moldes para palanques de cercas, marcos de georreferenciamento e bancos de uso externo. Com o início das vendas de palanques e tábuas surgiram oportunidades para a aplicação deste material em estruturas de pequeno porte, tais como pergolados, decks, balanças, apriscos, entre outros. Alguns dos produtos disponíveis pela empresa podem ser visualizados na Figura 1.

Figura 1 - Produtos em composto plástico reciclado



Fonte: Autoria própria, 2019.

Por meio de observações empíricas, o material indica ter potencial quanto a uma possível resistência química, substituindo ripamentos de madeira em apriscos que sofriam com uma alta recorrência de manutenção. Também demonstra potencial na aplicação estrutural em estruturas de pequeno porte, assim como pergolados e decks. Mas atualmente o que vêm limitando a melhor aplicação deste material é a falta de conhecimento técnico e científico de suas características, pois todas as estruturas até então, foram executadas experimentalmente a partir de tentativa e erro, sem nenhuma comprovação científica.

A partir desta oportunidade em melhorar a lucratividade de empresas do ramo de reciclagem, da oportunidade em utilizar resíduos plásticos nocivos ao meio ambiente na execução de pequenas estruturas, e da possibilidade do melhoramento de estruturas presentes em ambientes quimicamente agressivos, é de extrema importância estudar a real aplicabilidade de tal material em acordo com a metodologia científica.

2 OBJETIVOS

Assim foram estabelecidos os objetivos do presente trabalho, subdividindo-os em objetivo geral e específico.

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento mecânico do material composto obtido a partir da reciclagem de resíduos plásticos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram objetivados a obtenção de valores numéricos para as principais variáveis do cálculo estrutural de um lote do material, a comparação destes resultados com alguns materiais já estabelecidos na engenharia e uma breve análise do método construtivo empregado pela empresa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de estudo utilizou como base conceitos da pesquisa experimental, que busca compreender o comportamento mecânico do objeto de estudo com experimentos e com controle de variáveis. Com isso foram abordadas técnicas experimentais para obtenção de grande parte dos resultados.

Para o cumprimento do objetivo do presente trabalho, foi focado o estudo das propriedades físico-mecânicas do material. Onde as principais variáveis a serem determinadas foram: módulo de elasticidade, resistência à compressão, resistência à tração e resistência à flexão.

Primeiramente fora feita uma revisão bibliográfica das metodologias usuais para estudo de plásticos, tal qual metodologias usuais para o estudo de peças de concreto armado, madeira e aço, os quais são materiais estruturais comuns na execução de estruturas.

Dentro das diversas metodologias disponíveis para o estudo mecânico de materiais, foram planejados os procedimentos de acordo com seu grau de importância para a obtenção das principais variáveis a serem buscadas tal qual a disponibilidade de equipamentos. Dentre as circunstâncias previstas, foram idealizados os ensaios de:

- Resistência a tração direta;
- Flexão em 3 pontos;
- Resistência à compressão;

No caso de polímeros e compostos poliméricos, já existem metodologias definidas para a execução de tais ensaios, sendo elas:

- ISO 527, ASTM D638, ASTM D7291 e ASTM D412, para resistência a tração (MIB, 2014);
- ISO 604 e ASTM D695, para resistência a compressão (MIB, 2014);
- ISO 178 e ASTM D790, para flexão em 3 pontos (MIB, 2014);

Após a revisão da bibliografia já estabelecida, encontrou-se diversas inaplicabilidades, principalmente com relação à preparação das amostras dentro dos padrões exigidos pelas normas de tração indiretas, com isso foram feitas adaptações das normas para a realidade do material.

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para determinar as propriedades físicas mecânicas do compósito foram produzidos corpos de prova. A Figura 2 apresenta as matérias primas básicas utilizadas no composto.

Figura 2 - Matéria prima confecção amostras



Fonte: Autoria própria, 2019.

Fica indicado também na Tabela 1, as proporções das respectivas matérias primas medidas em função de seu volume.

Tabela 1 – Proporção volumétrica dos componentes do composto

PEAD	PEBD	PP	BOPP	OUTROS
25%	20%	20%	20%	15%

Fonte: Autoria própria, 2019.

Esta proporção adotada, é baseada nas características desejadas de cada material que compõem a mistura estando listadas na Tabela 2, além da prática no manuseio e processamento deste material pelo corpo técnico da empresa fabricante. Avaliação do reflexo dessa mistura será medida diretamente através do desempenho mecânico que será apresentado na sequência.

Tabela 2 - Características de polímeros quanto às propriedades físico-química

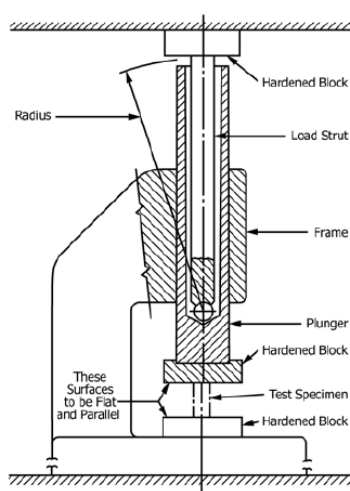
Polietileno de alta densidade (PEAD)	Polímero de cadeia simples, com alto peso molecular, possui alta resistência e durabilidade, podendo ser aplicado em situações de maiores carregamentos, como tubulações, tanques de combustível e embalagens de produtos quimicamente agressivos.
Polietileno de baixa densidade (PEBD)	Flexível, atóxico, baixo peso molecular, baixa reatividade, impermeável e a baixo custo, este é material muito indicado para itens de menor valor, ou embalagens alimentícias.
Polipropileno (PP)	Apresenta propriedades excepcionais de resistência mecânica, dispõem de boa resistência química e ainda é um ótimo isolante elétrico.
Polipropileno Bi orientado (BOPP)	Seu uso é amplo em embalagens flexíveis, muito aplicável para embalagens de alimentos, além de invólucros para presentes, flores, rótulos de garrafas PET, fitas adesivas, entre tantas outras aplicações.
Poli cloreto de vinila (PVC)	É um polímero atóxico, leve, sólido, resistente, impermeável, estável e que não propaga chamas. Além disso, sua reutilização tem baixo custo energético
Poli tereftalato de etileno (PET)	Principal uso na fabricação de garrafas para refrigerantes. Características como excelente resistência ao ataque de substâncias, resistência a deformações, baixo nível de absorção de umidade e baixo custo tornaram o PET um dos plásticos mais consumidos no mundo.

Fonte: Piatti & Rodrigues, 2005.

3.2 ENSAIO COMPRESSÃO

O ensaio de compressão consiste na aplicação de carga a uma taxa constante em uma amostra, onde posteriormente tal carregamento pode ser relacionado com a área de seção transversal da amostra afim de obter os valores de resistência a compressão do material estudado, podemos ver uma esquematização básica do ensaio na Figura 3 abaixo.

Figura 3 - Máquina de Teste Ensaio Compressão



Fonte: ASTM, 2015.

Para o presente trabalho objetivou-se inicialmente a aplicação das normas ISO 604 e ASTM D695.

Segundo a norma ASTM D695, os corpos de prova devem ser cilíndricos, e com altura igual a duas vezes seu diâmetro. Devido a disponibilidade de um único molde cilíndrico para a confecção das espécimes de teste, adotou-se amostras com diâmetro de 70 mm e altura de 140 mm, como mostra a Figura 4. A norma recomenda também a utilização de no mínimo 5 amostras por ensaio.

Figura 4 - Amostra ensaio compressão



Fonte: Autoria própria, 2019.

Para a execução dos ensaios foi-se utilizado do maquinário Emic DL30000N, equipado com uma célula de carga Trd 29, como mostra a Figura 5. Para a velocidade de teste, aplicou-se a uma taxa de 1 mm/min.

Figura 5 - Maquinário para ensaio a compressão

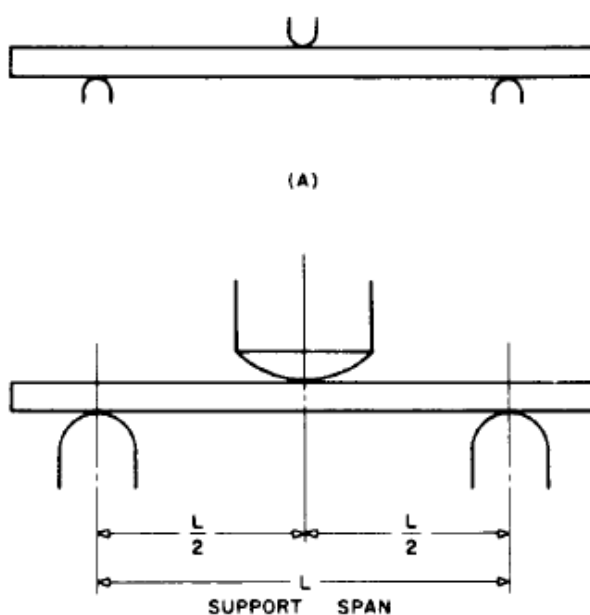


Fonte: Autoria própria, 2019.

3.3 ENSAIO FLEXÃO

O ensaio de flexão consiste na aplicação de uma carga, em 3 pontos colineares de um elemento esbelto, a fim de obter indiretamente os valores característicos de resistência a tração, compressão e modulo de elasticidade do material estudado, onde a distribuição das cargas ocorre de forma semelhante ao que mostra a Figura 6.

Figura 6 - Ensaio Flexão Três Pontos



Fonte: ASTM D790 – 03, 2003.

Para o ensaio de flexão, objetivou-se a aplicação das normas ISO 178 e ASTM D790-03.

Os corpos de prova adotados dispunham de seção quadrada, de 30mm de lado, com comprimento igual à 40cm, assim como demonstra Figura 7. A norma também recomenda a utilização de no mínimo cinco amostras para o ensaio da flexão.

Figura 7 - Amostras ensaio flexão



Fonte: Autoria própria, 2019.

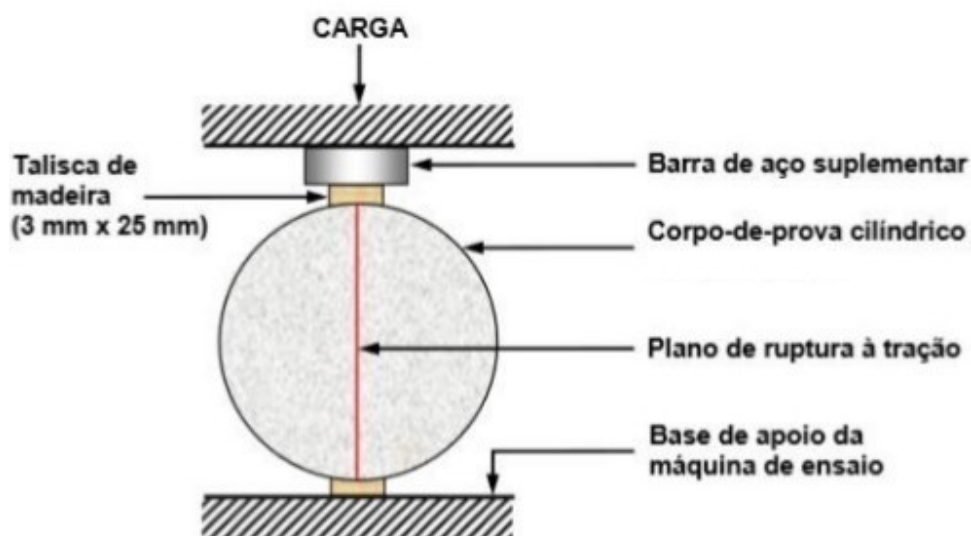
Para a execução dos ensaios foi-se utilizado do maquinário Emic DL30000N, equipado com uma célula de carga Trd 29. Onde se utilizou um suporte com apoios a uma distância de 265mm, como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Maquinário ensaio flexão



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 10 - Ensaio Tração Indireta



Fonte: METTA E MONTEIRO, 1994.

Para a execução dos ensaios previu-se a utilização do maquinário Emic DL30000N, equipado com uma célula de carga Trd 29. Onde utilizou-se pinças pneumáticas para o caso da tração direta, vide Figura 11, e duas chapas metálicas estreitas para o caso da tração indireta, como demonstra a Figura 12.

Figura 11 - Maquinário ensaio Tração Direta



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 12 - Maquinário ensaio Tração Indireta



Fonte: Autoria própria, 2019.

4 DESENVOLVIMENTO

Após a execução dos ensaios fora feita a análise os dados obtidos em cada ensaio.

4.1 RESULTADOS COMPRESSÃO

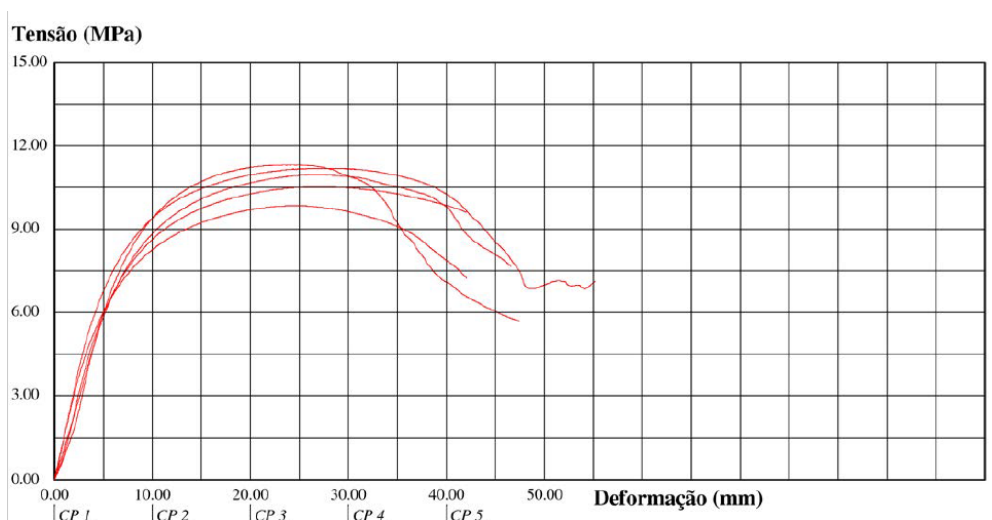
Foram executados dois ensaios de compressão o primeiro ensaio foi executado apenas um dia após a injeção das amostras, e o segundo após uma semana de envelhecimento, utilizando-se de cinco amostras em cada dia, seguindo-se os procedimentos recomendados pelas normas ASTM D695-15 e ISO 604, obtiveram-se os seguintes resultados.

4.1.1 Compressão de amostras frescas

O primeiro ensaio, feito no dia 27/09/2019, dispunha de amostras injetadas no dia 26/09/2019.

Para uma melhor precisão nos resultados, as cinco amostras foram retificadas de forma que sua base estivesse de forma perpendicular à sua altura e com isso os ensaios foram executados e os resultados obtidos seguem na Figura 13.

Figura 13 - Resultados Ensaio Compressão



Fonte: Autoria própria, 2019.

O presente ensaio resultou no valor médio de 10,78 Mpa para tensão última a compressão, com desvio padrão de 0,60 Mpa. Foi possível observar também que em nenhuma das situações o rompimento levou a peça a um colapso total, mesmo com o rasgamento e o esmagamento das amostras, como pode se notar na Figura 14, elas ainda continuaram a resistir à compressão.

Figura 14 - Amostra deformada ensaio compressão (a)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Após a remoção da carga notou-se também um retorno elástico bastante acentuado, mesmo com a perda de boa parte da seção da peça. Pode-se observar também, que a “casca” da amostra teve um comportamento bastante diferente ao cerne (centro), sendo notável uma separação via fissura entre o cerne mais esponjoso e a casca mais rígida, assim como demonstra a Figura 15.

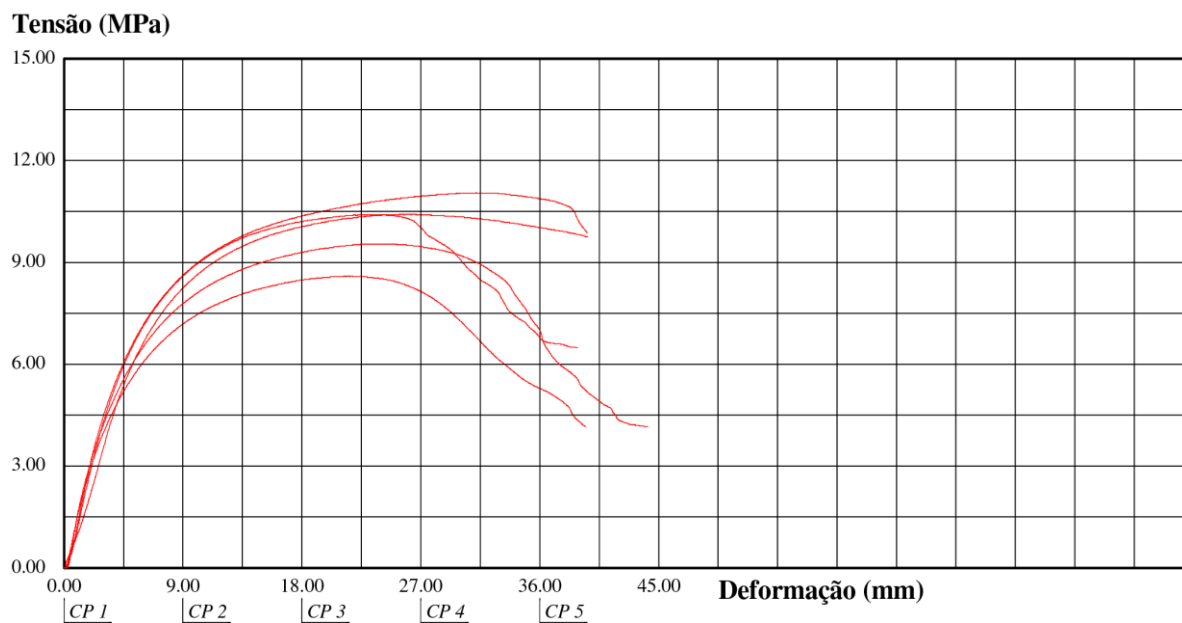
Figura 15 - Amostra deformada ensaio compressão (b)



Fonte: Autoria própria, 2019.

4.1.2 Compressão de amostras envelhecidas

Após a conclusão dos cinco ensaios com amostras frescas no primeiro dia de ensaios, notou-se que todas as amostras dispunham de umidade no seu interior pois ainda eram bastante frescas (cerca de 20 horas após sua injeção), com isso suspeitou-se da possibilidade da influência do envelhecimento das peças sobre a resistência das amostras. Para isso, foram ensaiadas cinco amostras extras, dessa vez a uma semana do dia da sua confecção, dessa forma, no dia 02/10/2019 repetiu-se o mesmo procedimento de ensaios a compressão com amostras do mesmo lote testado anteriormente, obtendo-se os resultados disponíveis na Figura 16.

Figura 16 - Resultados Compressão Amostras Envelhecidas

Fonte: Autoria própria, 2019.

Tal ensaio resultou em um valor médio de 10,01 Mpa para a tensão última a compressão, com desvio padrão de 0,85 Mpa. Notou-se também um padrão na deformação das amostras, a grande maioria das peças apresentaram um barril duplo durante sua compressão, assim como demonstra o esquema da Figura 17.

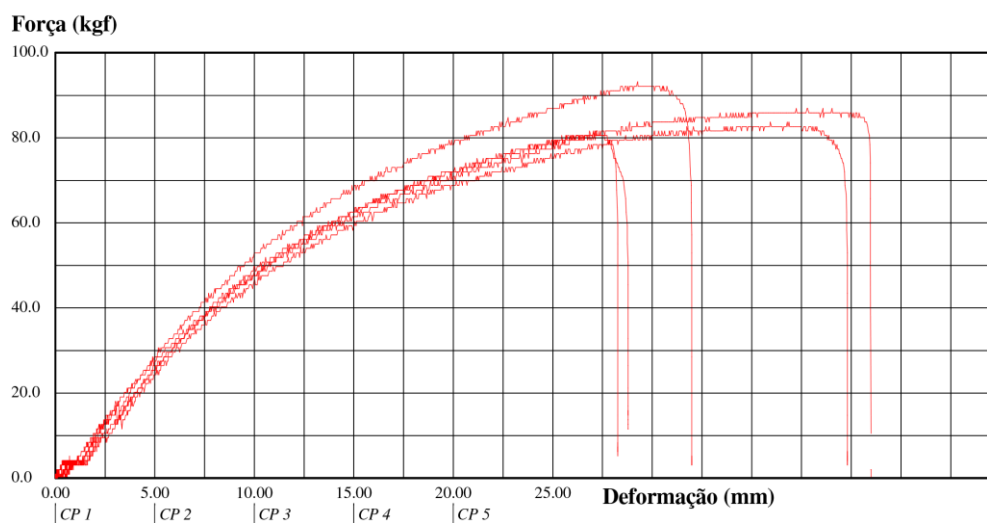
Figura 17 - Linha do tempo padrão de deformação a compressão

Fonte: Autoria própria , 2019.

4.2 RESULTADOS FLEXÃO

Seguindo-se os procedimentos descritos nas normas ASTM D790-03 e ISO178 executou-se os ensaios de flexão no dia 27/09/2019, obtendo-se os seguintes resultados disponíveis na Figura 18.

Figura 18 - Resultados Flexão em Três Pontos



Fonte: Autoria própria, 2019.

Segundo a ASTM D790-03, a partir do ensaio de flexão em três pontos é possível a obtenção do módulo de elasticidade a partir da Equação (1).

$$E_b = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (1)$$

, onde:

E_b = módulo de elasticidade (Mpa)

L = largura do suporte (mm)

b = base (mm)

d = altura (mm)

m = coeficiente angular da parte linear da curva (N/mm)

Com isso foi calculado o módulo de elasticidade de cada amostra, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Cálculo para obtenção do módulo de elasticidade

DIA 27/09/19			
CORPO DE PROVA	L (mm)	m (N/mm)	E (Mpa)
CP1	265	54	310,16
CP2	265	53	304,42
CP3	265	48	275,70
CP4	265	48	275,70
CP5	265	49	281,44

Fonte: Aatoria própria, 2019.

Assim obtemos um modulo de elasticidade médio de $E = 289,48$ MPa.

No ensaio da flexão em 3 pontos as amostras suportaram altas deformações antes de seu rompimento, mas diferentemente do ensaio à compressão, seu rompimento foi sempre por completo, assim como nota-se na Figura 19.

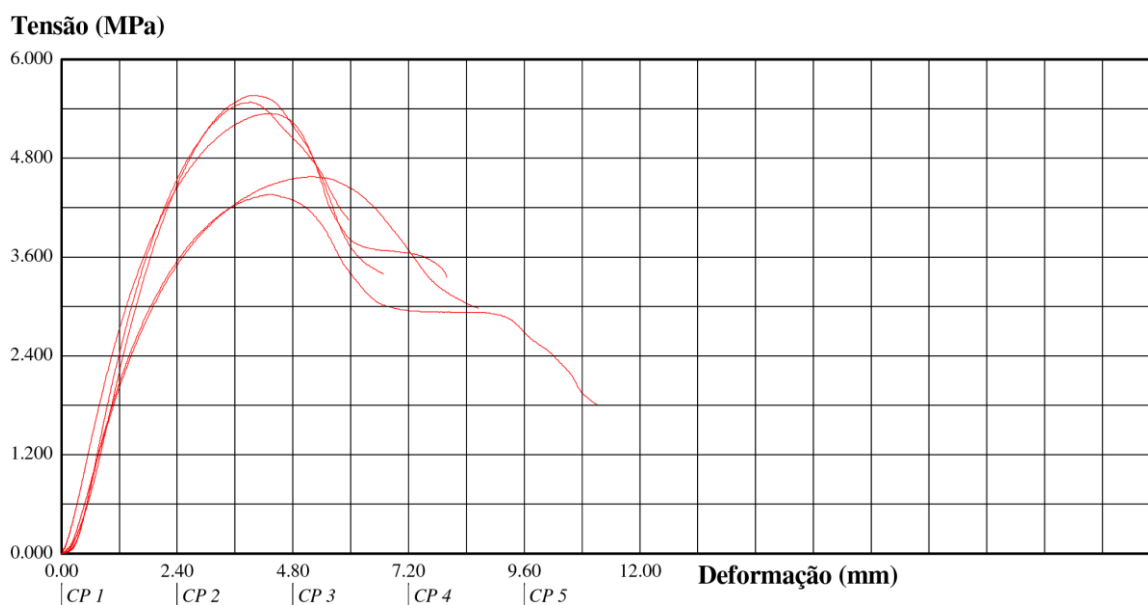
Figura 19 - Amostra rompida ensaio flexão 3 pontos

Fonte: Aatoria própria, 2019

4.3 RESULTADOS TRAÇÃO

Para os ensaios a tração, primeiramente objetivou-se o ensaio de tração direta descrito pela norma ASTM D638 – 14, infelizmente tal norma descreve uma amostra inexecutável ao método produtivo do presente material, pois mesmo as dimensões máximas da amostra padrão de tração eram muito inferiores ao bocal do maquinário injetor utilizado pela empresa. Também se excluiu a possibilidade de quaisquer métodos de conformação posterior à injeção, pois este tipo de material é poroso em seu cerne e mais homogêneo em sua superfície, ou seja, deve ser testada em sua configuração de espessura total (Carrol, 2000). Com isso, optou-se pela execução do ensaio de tração indireta, obtendo-se os resultados disponíveis na Figura 20.

Figura 20 - Resultados tração indireta

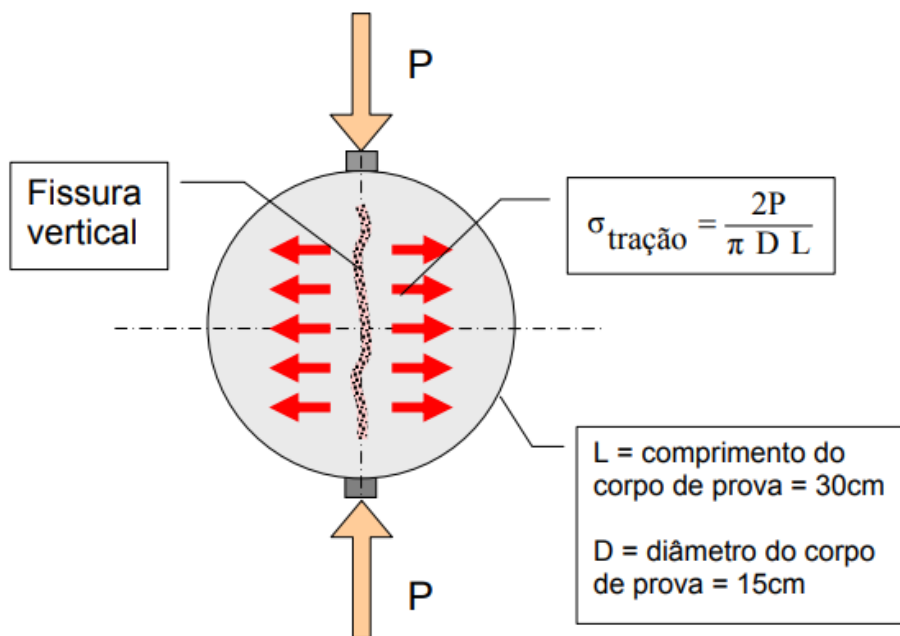


Fonte: Autoria própria, 2019.

Em alguns casos é possível notar um certo “patamar” relativamente constante no gráfico após o rompimento pela tração, isso se deve ao fato das amostras não colapsarem por completo, o que acabou gerando uma resistência a compressão após a falha do material à tração, tal anomalia pode ser desprezada pois não afeta a tensão máxima das amostras, mas serve muito bem para exemplificar a capacidade resistiva do material mesmo após a sua falha.

Como o próprio nome já sugere, com o ensaio de tração indireta não se obtém os resultados de resistência a tração diretamente, ou seja, devem ser convertidos de acordo com a relação presente na Figura 21.

Figura 21 - Conversão ensaio tração indireta



Fonte: C. S. Thomaz, [2019].

De forma que a partir dos resultados das cargas máximas de compressão obtidas no ensaio de tração indireta foram calculadas as respectivas tensões máximas à tração advindas de tal carga, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Tensões máximas a tração

DIA 02/10/19				
CORPO DE PROVA	FORÇA MÁXIMA (kg)	ALTURA (cm)	DIÂMETRO (cm)	TENSÃO MÁXIMA TRAÇÃO (MPa)
CP1	1419,4	14,5	7,05	8,839502
CP2	1489	14,7	7,05	9,146783
CP3	2173,2	14,6	7,05	13,44119
CP4	2088	14,9	7,05	12,65422
CP5	2140	14,9	7,05	12,96936

Fonte: Autoria própria, 2019.

Para tais resultados, o valor médio para a tensão última a tração é de 11,41 MPa, com desvio padrão de 2,26 MPa.

No ensaio de resistência a tração indireta, verificou-se a abertura da fissura vertical típica do rompimento por tração em cilindros, assim como percebe-se na Figura 22, validando assim os cálculos disponíveis na tabela 4.

Figura 22 - Amostra rompida ensaio tração indireta



Fonte: Autoria própria, 2019.

4.4 ANÁLISE DE RESULTADOS DOS ENSAIOS

Para que o elemento de um material tome aplicabilidade na construção em geral e venha ser eficientemente projetado é necessário que o projetista tenha um bom conhecimento dos parâmetros que caracterizam o seu comportamento. Assim objetivou-se a organização, análise e comparação das propriedades obtidas nos ensaios anteriores com alguns dos materiais mais utilizados na execução de estruturas. Na Tabela 5 observamos as principais propriedades obtidas no presente trabalho de forma resumida.

Tabela 5 – Características físico-mecânicas obtidas

RESULTADO	DATA	MÉDIA	DESV. PAD.	UNIDADE
TENSÃO ÚLTIMA COMPRESSÃO	27/09/2019	10,78	±00,60	Mpa
MÓDULO DE ELASTICIDADE COMPRESSÃO	27/09/2019	318,31	±13,72	Mpa
TENSÃO ÚLTIMA COMPRESSÃO	02/10/2019	10,01	±00,85	Mpa
MÓDULO DE ELASTICIDADE COMPRESSÃO	02/10/2019	328,64	±31,93	Mpa
MODULO DE ELASTICIDADE FLEXÃO	27/09/2019	289,48	±16,55	Mpa
TENSÃO ULTIMA TRAÇÃO	02/10/2019	11,41	±02,26	Mpa

Fonte: Autoria própria, 2019.

Com isso também se estabelece os valores médios de $\sigma_c=10,40\pm0,85$ Mpa para tensão última a compressão, de $\sigma_t=11,41\pm2,26$ Mpa para tensão última a tração e $E=312,14\pm31,93$ Mpa para o módulo de elasticidade. Nota-se que os resultados da tração e compressão se mostraram bastante similares, o que demonstra uma característica isotrópica, ou no máximo, levemente anisotrópica. Também é possível reparar que o envelhecimento durante uma semana não teve impacto relevante na resistência das peças, o que sugere que a curto prazo as propriedades mecânicas se mantêm e a umidade contida no material no experimento do dia 27/09/2019 não teve grande influência nos resultados estudados.

Outra propriedade muito significativa para o cálculo estrutural é a densidade e absorção de água, tal propriedade já foi estudada anteriormente onde obtiveram-se os valores médios de $0,9217$ g/cm³ para a densidade e $0,25117\%$ para a absorção de água (UTRI, 2015). Assim para efeitos de comparação foram levantados na Tabela 6 as principais características acerca de alguns materiais já estabelecidos em sua aplicação estrutural.

Tabela 6 – Comparação entre os materiais estruturais mais utilizados em construções

MATERIAL	DENSIDADE (KN/M ³)	RESISTÊNCIA A COMPRES- SÃO (MPA)	MÓDULO DE ELÁSTICIDADE (MPA)	RELAÇÃO RESIST./ DENSIDADE	RELAÇÃO MÓDULO/ DENSIDADE
Concreto	24	20*	20000	0,83	833
Aço	78	250**	210000	3,21	2692
Madeira-conífera	6	50***	10000	8,33	1667
Madeira-dicotiledô- nea	9	90***	25000	100,22	2778
Composto plástico reciclado	9,2	10	312,14	1,09	33,93

*Resistência característica da compressão usual para concreto usinados

**Tensão de escoamento para o aço ASTM A-36

***Valor médio da resistência a compressão paralela às fibras

Fonte: Adaptado DIAS e CALIL,1997.

Assim podemos reparar que quando se trata de resistência a compressão em função da densidade o material estudado é mais eficiente que o concreto, e apenas três vezes menos eficiente que o aço. Já quando analisamos o módulo de elasticidade podemos reparar em uma deficiência no material, o que tornaria o material inviável em aplicações de grande porte principalmente para cumprir os requisitos do estado de limite de serviço, que leva em conta as deformações da estrutura. Este tipo de conclusão já foi descrito por outros autores que estudaram materiais semelhantes onde concluiu-se que "Um aspecto crítico do plástico é sua rigidez, considerada baixa frente aos outros materiais estruturais" (Parente, 2006) e "A resistência da madeira plástica é comparável à da madeira, mas o módulo de elasticidade é muito menor" (Applebaum et al.,1991; Dahl,1993; Lampo et al., 1996a; Lampo et al. 1996b; McLaren,1995; Van Ness et al., 1995; Xie et al.,1997; Blizard et al.,1997).

4.5 MÉTODO CONSTRUTIVO EMPREGADO

Para a execução de estruturas de pequeno porte, a empresa utiliza de métodos construtivos bastante semelhantes a madeira, tanto para cortes quanto para a fixação de elementos. Tal trabalhabilidade já foi estudada por outros autores, onde se observou "A vantagem de usar a madeira plástica é que ela pode ser tratada como madeira. Pode ser cortada e perfurada com as mesmas ferramentas que seriam usadas na madeira e pode ser presa com os mesmos pregos e parafusos" (Carroll, 2000).

4.5.1 Pergolado

O pergolado padrão produzido pela empresa, vide a Figura 24, dispõem de quatro pilares enterrados no solo, normalmente a 50cm de profundidade para garantir o seu engastamento.

Figura 23 - Pergolado padrão Replastik



Fonte: Autoria própria, 2019.

Para a fixação das vigas sobre os pilares, são utilizadas quatro mãos francesas metálicas, que também auxiliam na redução da deformação da viga, fixadas por meio de parafusos passantes. As mãos francesas possuem 30cm de altura e 40cm de comprimento, são confeccionadas com três chapas de aço com no mínimo 8mm de espessura soldadas entre si formando uma treliça, vide a Figura 25.

Figura 24 - Ligação em mão francesa metálica

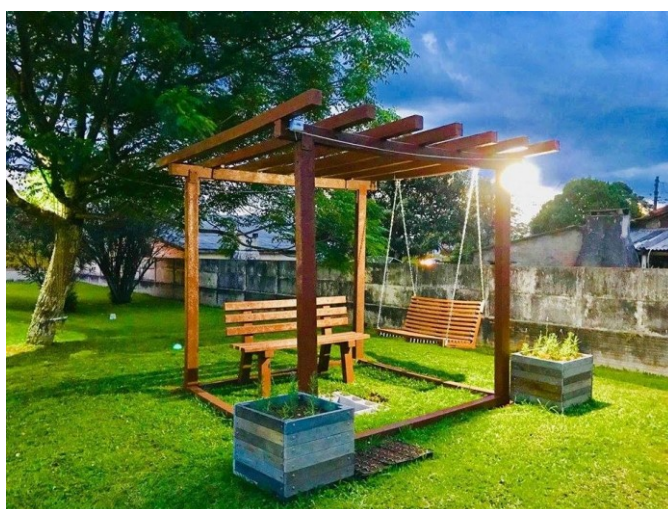


Fonte: Autoria própria, 2019.

Sobre as vigas normalmente são instalados de 5 a 7 caibros, fixados com o uso de parafusos passantes. Também é bastante comum o uso de mais quatro mãos francesas metálicas menores, instaladas perpendiculares às instaladas anteriormente, fixadas em dois caibros ditos como “mestres”, melhorando assim a rigidez da estrutura para ambas direções horizontais.

Nos pergolados também é comum a instalação de balanços, que são instalados nas vigas ou caibros da estrutura e fixados com argolas de aço, penduradas com correntes assim como mostra a Figura 26.

Figura 25 - Instalação de balanço em pergolado



Fonte: Autoria própria, 2019.

4.5.2 Deck

O deck é feito a partir do engastamento de pilares no solo, a cerca de 30cm de profundidade, normalmente tais pilares ficam a cerca de 20cm acima do solo para decks, mas em casos de trapiches para margem de lagos e lagoas podem dispor de até 1,5m de altura, mas nesses casos devem ser engastados no leito do corpo d'água.

Sobre os pilares são dispostas vigas, espaçadas a cerca de 50cm entre si formando assim uma malha na qual serão aparafusadas as tábuas as quais formam a superfície caminhável do deck, um exemplo de deck pode ser observado na Figura 27.

Figura 26 - Trapiche e deck



Fonte: Autoria própria, 2019.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho evidenciou como a necessidade da inovação dentro da reciclagem de plásticos resultou no desenvolvimento do material estudado e torna o estudo e aplicação deste tipo de matéria prima tão importante para a sociedade.

Também foram estabelecidos e organizados valores numéricos para as principais variáveis no cálculo estrutural chegando-se nos valores médios de $\sigma_c=10,40\pm 0,85$ Mpa para tensão a compressão, de $\sigma_t=11,41\pm 2,26$ Mpa para tensão a tração e $E=312,14\pm 31,93$ Mpa para o módulo de elasticidade. Foram discutidos também que tais valores condizem com a aplicação em pequenas estruturas, mas o módulo de elasticidade é bastante inferior frente a outros materiais estruturais, o que pode se tornar um fator limitante na aplicação deste tipo de material.

Assim conclui-se que, para solicitações de pequenos esforços o material se mostra promissor, e é de grande importância o refinamento de tais resultados com trabalhos mais aprofundados estudando sua resistência ao intemperismo, agressões químicas e a influência da temperatura em sua resistência mecânica, por exemplo. Também é de grande relevância os estudos de viabilidade econômica do material quando comparado aos materiais construtivos já estabelecidos, de como diferentes proporções da mistura do composto pode influenciar na resistência do material, da influência da temperatura na resistência do material, desenvolver modelo de cálculo estrutural para este tipo de material.

REFERÊNCIAS

ONU. Meio ambiente. [S. l.], [2019]. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/acao/meio-ambiente/>. Acesso em: 28 maio 2019.

WWF. Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização. Relatório, [S. l.], 2019.

MIB. Ensaios e Práticas de Preparação "Polímeros". [S. l.], 2014. Disponível em: <http://www.mib.eng.br/analises-polimeros-mecanica>. Acesso em: 5 jun. 2019.

IPEA. Situação Social das Catadoras e dos Catadores de Material Reciclável e Reutilizável. Brasil: SBS, 2013.

ASTM. D790-03. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, [S. l.], 2003.

ASTM. D638-14. Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastics, [S. l.], 2014.]

ASTM. D695-15. Standard Test Methods for Compressive Properties of Rigid Plastics, [S. l.], 2014.

ISO. 527-1. PLASTICS – Determination of Tensile Properties, [S. l.], 2012.

ISO. 178. PLASTICS – Determination of Flexural Properties, [S. l.], 2001.

ISO. 604. PLASTICS – Determination of Compressive Properties, [S. l.], 2002.

PARENTE, Ricardo Alves. Elementos estruturais de plástico reciclado. 2006. Dissertação (Doutorado em engenharia de estruturas) - Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, [S. l.], 2006.

MARTINS, Agnes F; SUAREZ, João Carlos M.; MANO, Eloisa B. Produtos poliolefinicos reciclados com desempenho superior aos materiais virgens correspondentes. Polímeros: Ciência e Tecnologia, out/dez 1999.

PIATTI, T. M; Rodrigues, R. A. F. Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais. Série: Conversando sobre Ciências em Alagoas. Maceió, UFAL, 2005.

ALBANO, C.; SANCHEZ, G. (1999). Estudo de propriedades mecânicas, térmicas e termodegradativas de PP virgem com PEAD reciclado e não reciclado. Engenharia e ciência de polímeros, v.39, agosto 1999.

APPLEBAUM MD, VAN NESS KE, NOSKER TJ, RENFREE RW, MORROW DR. Propriedades de plásticos pós-consumo compostos reforçados refinados, SPE ANTEC '91: Processos de Conferências, Montreal, Canadá, 5-9 de maio de 1991, p. 2155-61.

MARQUES NUNES, Deivid; RÚBIA DA SILVA, Mara; COBIANCHI NIGRO, Idamar Sidnei. VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM EMPREENDIMENTO PARA RECICLAGEM DE GARRAFAS PET NA CIDADE DE UBERLÂNDIA/MG. 2007. Dissertação (Engenharia de produção) - Uniminas, [S. l.], 2007.

VT BRESLIN , U. SENTURK , CC BERNDT. Propriedades de engenharia a longo prazo de madeira plástica reciclada usada na construção de cais
Recurso. Conserv. Reciclar. , 23 (1998) , pp. 243 – 258.

DAHL ME. Madeira plástica reciclada: uma história de caso, táticas de sobrevivência dos anos 90. Conferência SPE, Brookfield, CT, 14-16 de junho de 1993. p. 17-22.

KYANKA, GH. Considerações especiais no projeto de conexões para madeira composta de madeira / plástico reciclado, Structures Congress'94, Atlanta, GA, 24-28 de abril de 1994. p. 929-33.

LAMPO RG, NOSKER TJ, KERNS R, RENFREE RW, MCLAREN MG. Conceitos inovadores de projeto estrutural para materiais plásticos de madeira serrada. SPEANTEC'96: Anais da Conferência, Indianapolis, IN, 5–10 de maio de 1996. p. 3151-55.

LAMPO RG, NOSKER TJ, RENFREE RW. Considerações de design para o uso de madeira plástica em aplicações estruturais, materiais para o novo milênio. Anais da Quarta Conferência de Engenharia de Materiais, Washington DC, 10-14 de novembro de 1996. p. 1492–00.

KY XIE , DC LOCKE , D. HABIB , M. JUIZ , C. KRIS. Impacto químico ambiental de madeiras de plástico reciclado usadas no cais da rua Tiffany, South Bronx, Nova York
Recurso. Conserv. Reciclar. , 21 (1997) , pp. 199 – 211.

YANG SG, BENNETT D, BEAUTY CL. Estudo da fadiga à flexão de plásticos reciclados misturados. SPEANTEC'94: Plastics: Conference Proceedings, São Francisco, CA, de 1 a 5 de maio de 1994. p. 1852-54.

DIAS, ANTONIO ALVES E CALIL JR., CARLITO, “Utilização da madeira em construções rurais”. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, Vol. 1, pp. 71-77, 1997.

UTRI, Thomas Cebulski. Caracterização em material compósito de plásticos e fibra vegetal. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

THOMAZ, Prof. Eduardo C. S. Ensaio de compressão diametral, ou ensaio de tração indireta, criado pelo Prof. Fernando Luiz Lobo Carneiro. [2019]. Notas de aula.