



Alexandre Salomão Barile Sobral

**VIGA DE CONCRETO ARMADO
UTILIZANDO GARRAFAS PET**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Mestrado Profissional em Processos Construtivos
e Saneamento Urbano

Dissertação orientada pelo Professor Dr. Dênio Ramam Carvalho
de Oliveira



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
MESTRADO EM PROCESSOS CONSTRUTIVOS E SANEAMENTO URBANO**

**VIGA DE CONCRETO ARMADO
UTILIZANDO GARRAFAS PET**

ALEXANDRE SALOMÃO BARILE SOBRAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Processos Construtivos e Saneamento Urbano da Universidade Federal do Pará como requisito para a obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira

Belém – PA
2016

VIGA DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO GARRAFAS PET

ALEXANDRE SALOMÃO BARILE SOBRAL

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Processos Construtivos e Saneamento Urbano, área de concentração Estruturas, Construção Civil e Materiais – Linha de Pesquisa Estruturas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Profissional em Processos Construtivos e Saneamento Urbano (PPCS) do Instituto de Tecnologia (ITEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Aprovada em 30 de março de 2016.

Prof. Dr. Bernardo Borges Pompeu Neto
(Coordenador do PPCS)

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
(Orientador – UFPA)

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Nívea Gabriela Benevides de Albuquerque
(Examinador Externo – UnB)

Prof. Dr. Bernardo Nunes Moraes Neto
(Examinador Interno – UFPA)

Belém – PA
2016

A Deus pela sua indiscutível presença imanente e por todas as bênçãos que graciosamente me tem concedido ao longo de toda a minha vida.

A minha família pelo apoio constante, por entender minha ausência e pela torcida por minha vitória nesse projeto de vida.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, minha mãe Carmen Barile Sobral e meu pai Antônio Sobral (in memória) que estarão sempre ao meu lado nas conquistas e nos momentos difíceis. Aos meus sogros Francisco Xavier Monteiro e Marlene Moreira Monteiro. A minha amada esposa, Marcilene Moreira Monteiro Sobral, aos meus amados filhos Adriel Monteiro Sobral, Alexandre S. B. Sobral Júnior e Arthur Gabriel Monteiro Sobral e aos meus irmãos e cunhados, em especial ao meu irmão Álamo Salomão Barile Sobral pelo apoio nos experimentos finais em Belém-PA.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira, pela orientação para o desenvolvimento desta pesquisa, pela amizade e disponibilidade permanente para me atender durante a realização deste trabalho.

Aos professores da Universidade Federal do Pará que ministraram o curso de Mestrado no município de Tucuruí/PA.

Aos graduandos em Engenharia Civil, Vander Melo e Adenor pelo apoio na realização dos trabalhos.

Aos funcionários dos Laboratórios de Engenharia Civil da UFPa pelo apoio na realização dos experimentos.

A todos os demais que, direta ou indiretamente contribuíram na realização deste trabalho.

Ao GAEMA/UFPa e ao IPEAM, pela disponibilidade dos laboratórios da Universidade para realização dos experimentos.

RESUMO

A utilização da garrafa PET na construção civil, tornou-se muito comum, haja vista, que pode ser utilizada na construção de paredes, confecção de telhas, entre outros. Já existem muitos estudos onde verificou-se a utilização da garrafa PET como componente da estrutura ou da construção em si e que mostram resultados satisfatórios. A otimização na execução de peças em concreto armado visando garantir redução de peso próprio, bem como, a redução de materiais empregados e conseqüentemente a redução do custo, é um caso que requer uma atenção na área da construção civil. As vigas ocas ou vazadas são uma boa alternativa para esta otimização, portanto neste trabalho foram ensaiadas no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará 4 vigas com seção de (120 x 400) mm² e 2200 mm de comprimento, sendo 1 maciça para referência e 3 delas com área vazada: a primeira (Viga V1) utilizando-se um linha de garrafa PET de 600 ml deitada, a segunda (Viga V2) com duas linhas de garrafa PET deitadas (uma garrafa sobre a outra) e a terceira (Viga V3) com três linhas de garrafas deitadas (também uma sobre a outra) todas dispostas longitudinalmente na viga. Foi estudada a presença de armadura de cisalhamento, o modelo de ensaio Stuttgart e foi realizada a comparação da capacidade de carga entre as vigas ensaiadas. Vigas ocas ou vazadas apresentaram comportamento próximo a viga de referência. Houve uma redução de volume e conseqüentemente de peso entre as Vigas VR e V3 de aproximadamente 15,3% e uma perda de resistência ao cisalhamento entre as mesmas vigas de aproximadamente 26,3%. Os resultados dos ensaios foram comparados com as recomendações da NBR 6118 (2014) e verificou-se uma proximidade entre os resultados.

Palavras-chave: Viga, concreto armado, cisalhamento, garrafa PET.

ABSTRACT

The use of PET bottle in civil construction became very common, considering that can be used in walls construction, making of tiles, among others. There are already many studies where it was found the use of PET bottle as component of structure or of construction itself and show satisfactory results. The optimization at execution of pieces in reinforced concrete aiming ensure reduction of own weight, as well as, reduction of materials employed and consequently the reduction of the cost, it's a case requires a attention at civil construction area. The hollow or empty beams are a good alternative for this optimization, so in this study it were tested at Civil Engineering Laboratory of Federal University of Pará 4 beams with section of (120 x 400) mm² and 2200 mm of length, being 1 massive for reference and 3 of them with empty area: the first (Beam B1) using one line of PET bottle of 600 ml lying, the second (Beam B2) with two lines of PET bottle lying (one bottle over the other) and the third (Beam B3) with three lines of bottles lying (also one over the other) all disposed longitudinally in the beam. It was studied the presence of armor of shear and the model test Stuttgart and was performed the comparison of load capacity between the tested beams. Hollow beams showed behavior near to reference beam. There was a reduction of volume and consequently of weight between the beams BR and B3 of nearly 15,3% and a loss of resistance to shear between the same beams of nearly 26,3%. The tests results were compared with the NBR 6118 (2014) recommendations and it was found a nearness between the results.

Key words: Beam, reinforced concrete, shear, PET bottle.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Censo de reciclagem de garrafas PET no Brasil (ABIPET, 2015)	20
Figura 2 - Evolução do índice de reciclagem de garrafas PET no Brasil (ABIPET, 2015)	21
Figura 3 - Consumo de garrafas PET no Brasil por região (ABIPET, 2015).....	22
Figura 4 - Esquema da montagem dos blocos utilizando garrafas PET (Galli <i>et al.</i> ,2014).....	23
Figura 5 - Legenda e posicionamento dos materiais (Galli <i>et al.</i> ,2014).....	23
Figura 6 - Vista frontal do bloco utilizando garrafas PET (Galli <i>et al.</i> ,2014)	23
Figura 7 - Vista lateral do bloco utilizando garrafas PET (Galli <i>et al.</i> ,2014).....	24
Figura 8 - Construção de casas utilizando garrafas PET (Gomes,2014)	24
Figura 9 – Outro modelo de casa utilizando garrafas PET (Gomes,2014).....	25
Figura 10 – Casa utilizando garrafas PET em fase de construção (Gomes,2014)	25
Figura 11 - Construção de lajes pré-moldadas utilizando garrafas PET (Gomes,2014)	25
Figura 12 – Polli-bricks e o Edifício Eco Ark (Huang, 2012)	26
Figura 13 - Montagem da estrutura com BubbleDeck (Moreira,2014).....	27
Figura 14 - Evolução da fissuração (Pinheiro <i>et al.</i> , 2010)	29
Figura 15 - Analogia de treliça (Pinheiro <i>et al.</i> , 2010).....	29
Figura 16 - Ruptura por esmagamento da biela (Pinheiro <i>et al.</i> , 2010)	31
Figura 17 - Ruptura da armadura transversal (Pinheiro <i>et al.</i> , 2010).....	32
Figura 18 - Ruptura do banzo comprimido, decorrente do esforço cortante (Pinheiro <i>et al.</i> , 2010)	32
Figura 19 - Ruína por flexão localizada da armadura longitudinal (Pinheiro <i>et al.</i> , 2010).....	33
Figura 20 - Carregamento com duas cargas concentradas (Chaer & Oliveira,2001).....	34
Figura 21 - Trajetórias principais de tração e compressão (Chaer & Oliveira,2001)	34
Figura 22 - Presença de tensões cisalhantes (Chaer & Oliveira,2001)	35
Figura 23 - Panorama de fissuração (Chaer & Oliveira,2001)	35
Figura 24 - Modelo de Treliça (Chaer & Oliveira,2001)	36
Figura 25 - Seção transversal das vigas (Rodrigues <i>et al.</i> , 2014)	38
Figura 26 - Ensaio da viga VSR (Rodrigues <i>et al.</i> , 2014)	38
Figura 27 - Viga de Referência – VR	44
Figura 28 - Viga com uma linha de garrafa PET – V1	44
Figura 29 - Viga com duas linhas de garrafa PET – V2.....	44
Figura 30 - Viga com três linhas de garrafa PET – V3	45
Figura 31 - Forma das Vigas.....	45

Figura 32 - Vigas Concretadas.....	46
Figura 33 - Posição dos extensômetros nas vigas.	47
Figura 34 - Vista 3D do modelo de ensaio de Stuttgart.....	48
Figura 35 - Esquema do modelo de ensaio de Stuttgart	48
Figura 36 - Viga VR no sistema de ensaio	49
Figura 37 - Viga V1 no sistema de ensaio	49
Figura 38 - Viga V2 no sistema de ensaio	50
Figura 39 - Viga V3 no sistema de ensaio	50
Figura 40 - Resistência a compressão simples (MPa)	51
Figura 41 - Corpos de prova ensaiados	51
Figura 42 - Viga VR pós-ensaio / Mapa de fissuração.....	52
Figura 43 - Viga V1 pós-ensaio / Mapa de fissuração	53
Figura 44 - Viga V2 pós-ensaio / Mapa de fissuração	53
Figura 45 - Viga V3 pós-ensaio / Mapa de fissuração	53
Figura 46 – Deslocamentos verticais nas vigas.....	54
Figura 47 - Deformações na superfície do concreto.....	54
Figura 48 - Deformações na armadura de flexão	55
Figura 49 - Deformações na armadura de cisalhamento	56

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Características das garrafas PET (Whinfield e Dickson, 1941)	19
Tabela 2 - Características das vigas ensaiadas (Rodrigues <i>et al.</i> , 2014)	37
Tabela 3 - Carga última (Pu) das vigas ensaiadas (Rodrigues <i>et al.</i> , 2014)	39
Tabela 4 – Resultados para as Cargas de Ruptura (NBR 6118:2014).....	42
Tabela 5 – Valores empregados nas variáveis	42
Tabela 6 - Economia de concreto e a redução de peso.....	45
Tabela 7 - Resultado dos ensaios dos corpos-de-prova.....	51
Tabela 8 - Características das barras de aço.	52
Tabela 9 – Comparação: resultados de cálculos (NBR) x resultados ensaios.	56

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	14
1.1 - Justificativa	15
1.2 - Objetivos do Trabalho	15
1.3 - Estrutura do trabalho	16
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 - Caracterização dos plásticos e garrafas PET	17
2.1.1 - Os principais tipos de plásticos.....	18
2.1.2 - Caracterização de PET	19
2.1.3 - Sustentabilidade Ambiental.....	19
2.1.3.1 - Benefícios Sociais	20
2.1.3.2 - Benefícios Econômicos	21
2.1.3.3 - Benefícios Ambientais	21
2.2 - Alguns trabalhos já realizados utilizando garrafas PET.....	22
2.2.1 - Uso de garrafas de poli-tereftalato de etileno – PET como insumo alternativo na construção de edificações residenciais.....	22
2.2.2 - Empresa do Rio Grande do Norte lança projeto de construção de casas com garrafa PET.....	24
2.2.3 - ECO ARK: Edifício em Taiwan feito com garrafas de plástico.....	26
2.2.4 - Rio-Galeão substitui concreto por esferas plásticas na construção do novo estacionamento.....	26
2.3 - Cisalhamento em vigas.....	27
2.3.1 - Comportamento resistente	27
2.3.2 - Modelo de treliça	29
2.3.3 - Modos de Ruína	30
2.4 - Ensaio de Stuttgart	33
2.4.1 - Histórico	33
2.4.2 - Fundamentação Teórica – Modelo Experimental.....	34
2.5 - Trabalho semelhante realizado	37
2.5.1 - Rodrigues et al. (2014)	37
2.5.1.1 - Cargas últimas e modos de ruptura observados.....	38
2.6 – Recomendações Normativas	39
2.6.1 - Resistência ao cisalhamento de acordo com a NBR 6118:2014.....	39

CAPÍTULO 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL	42
3.1 - Aplicação das expressões normativas para determinação das cargas de ruptura	42
3.1.1 - Valores empregados nas variáveis	42
3.2 - Armaduras, características das vigas e formas	43
3.2.1 - Armaduras de flexão e cisalhamento	43
3.2.2 - Características das vigas	43
3.2.3 - Alguns cuidados no processo de montagem	46
3.3 - Instrumentação	46
3.3.1- Deslocamentos verticais	46
3.3.2 - Deformação nas armaduras e no concreto	46
3.4 - Sistema de ensaio	47
CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
4.1 - Propriedades dos Materiais	51
4.2 - Vigas pós-ensaio / Mapas de fissuração	52
4.3 - Deslocamentos verticais – Leitura no Deflectômetro	53
4.4 - Deformações na superfície do concreto – Leitura no Extensômetro	54
4.5 - Deformações na armadura de flexão - Leitura no Extensômetro	55
4.6 - Deformações na armadura de cisalhamento - Leitura no Extensômetro	55
4.7 - Comparação dos resultados dos cálculos (NBR) x resultados dos ensaios	56
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	57
5.1 - Conclusões	57
5.2 - Sugestões para trabalhos futuros.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
ANEXO A1 - Planilha de cálculo de acordo com a NBR 6118:2014 – Viga VR.....	61
ANEXO A2 - Planilha de cálculo de acordo com a NBR 6118:2014 – Viga V1.....	62
ANEXO A3 - Planilha de cálculo de acordo com a NBR 6118:2014 – Viga V2.....	63
ANEXO A4 - Planilha de cálculo de acordo com a NBR 6118:2014 – Viga V3.....	64

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Algumas matérias primas tradicionais da construção civil têm reservas mapeadas escassas. Portanto, torna-se necessário o desenvolvimento de alternativas que possam substituir estes materiais na indústria da construção civil. Embalagens pós-consumo de PET, são cada vez mais frequentes na composição do lixo urbano e descartadas indevidamente no meio ambiente, causando danos a estrutura de saneamento urbano. Surge a necessidade de um reaproveitamento destas embalagens.

De acordo com Canellas (2005), o volume de resíduos domésticos produzidos em todo o mundo aumentou três vezes mais do que a sua população nos últimos 30 anos, assim como, o crescimento do uso de embalagens descartáveis, a cultura do consumo e o desperdício são responsáveis pelo descarte de 30 bilhões de toneladas de resíduos sólidos no planeta todos os anos.

Segundo o CEMPRE (2009), a produção média de resíduos sólidos urbanos no Brasil está na ordem de 0.7kg/hab.dia, em cidades como Rio de Janeiro e São Paulo chegam a gerar 1kg/hab.dia, e desta forma, são descartados diariamente 140.000 toneladas, nem sempre em locais adequados. Deste total, 76% acabam em lixões (área de depósito de resíduos urbanos sem tratamento), acarretando a contaminação do solo, dos mananciais, além de aumentar significativamente a ocorrência de zoonoses. Desta forma a filosofia dos 3Rs, ou seja, reduzir, reutilizar e reciclar, tratando o problema em sua origem, vem sendo um procedimento permanente, buscando a minimização desta situação. A reciclagem, como todo processo também pode gerar resíduo e muitas vezes, exige grandes investimentos. Porém, mesmo com estas restrições, apresenta-se como a melhor solução.

No Brasil a prática da reciclagem ainda apresenta-se de forma incipiente, mas o cenário indica sinais de melhora, 6 em cada 10 garrafas PET são recicladas, índice que nos coloca à frente de países europeus e até mesmo dos Estados Unidos. Mesmo assim, 40% delas ainda vão parar nos lixões, comprometendo o meio ambiente e a qualidade de vida. Para aumentar a reutilização e reciclagem desse tipo de material, a criatividade é uma forte aliada. Segundo a Resolução Conama n. 307/2002 Resíduos de Construção Civil de classificação A, provenientes de demolição de construção, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; de edificações:

materiais cerâmicos (tijolos, azulejos, blocos, telhas, placas de revestimento...etc) argamassa e concreto; de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc..) produzidos nos canteiros de obras, entre outros, devem ser triturado e utilizados no preenchimento das garrafas para que elas apresentem maior resistência à compressão.

Novas alternativas para reutilização destas embalagens pós-consumo necessitam ser propostas, de modo a evitar o descarte em aterros sanitários e no meio ambiente onde, por não serem de rápida decomposição, acarretam problemas de ordem operacional nos aterros sanitários, dificultando a compactação da parte orgânica, além da significativa perda econômica e social, uma vez que a indústria da reciclagem gera empregos e usa mão-de-obra de baixa qualificação. Segundo Canellas (2005) o conhecimento das características tecnológicas dos resíduos aumenta a possibilidade de utilização dos produtos confeccionados com estes materiais, além da redução da geração de resíduos mais danosos que os originais, uma vez que todo processamento gera resíduo.

Com o crescimento da indústria da construção civil no Brasil, principalmente devidos a programas do governo federal como o PAC, novas metodologias construtivas, bem como novos materiais precisam ser buscados para se tornarem alternativas de utilização nas obras. Para Inoue (1996) e Chiad (2013), elementos de concreto armado com seção vazada são bastante utilizados em pontes, postes sob flexão composta, entre outros, visando aumentar a rigidez diminuindo o peso próprio do elemento. Esta metodologia de construção poderia ser utilizada em obras convencionais como construção de casas populares, ou obras com estrutura em concreto armado de pequeno e médio porte.

1.1 - Justificativa

Existem poucos estudos sobre a inserção de garrafas PET em vigas de concreto armado com o objetivo de se obter uma área vazada na seção inferior de uma viga quando a mesma está bi-apoiada, visando verificar o comportamento quando submetidos a esforços de flexão, a economia de concreto (conseqüentemente de materiais e custo), redução de peso e destino adequado para garrafas PET.

1.2 - Objetivos do Trabalho

a) Caracterização dos plásticos e garrafas de PET;

- b) Analisar experimentalmente 4 (quatro) vigas;
- c) Apresentar uma alternativa para reutilização de garrafas PET introduzindo-as na confecção de vigas em concreto armado;
- d) Analisar e discutir os resultados dos ensaios compará-los com os estimados através das recomendações da norma NBR 6118:2014.

1.3 - Estrutura do trabalho

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, com os seguintes conteúdos:

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre, caracterização e tipos de plásticos e garrafas PET, bem como, dados da ABIPET sobre consumo de garrafas PET, alguns trabalhos realizados utilizando garrafas PET e informações sobre sustentabilidade ambiental. Cisalhamento em vigas, ensaio de Stuttgart e trabalho similar realizado.

O terceiro capítulo apresenta o programa experimental adotado da pesquisa, que consiste no sistema de ensaio de 4 vigas (sendo 1 maciça e 3 vazadas).

No quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados experimentais, comparando os valores das cargas de ruptura e os modos de ruptura com as estimativas obtidas através das normas técnicas. Também são apresentados os resultados dos ensaios para caracterização do aço e do concreto utilizados na confecção das vigas.

O quinto capítulo apresenta as conclusões desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho e em anexo são apresentadas as tabelas com os cálculos das tensões de ruptura das vigas de acordo com a NBR 6118:2014.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os tipos de plásticos e a caracterização das garrafas PET, bem como, dados da ABIPET (2015) sobre consumo de garrafas PET, alguns trabalhos realizados utilizando garrafas PET e informações sobre sustentabilidade ambiental. A abordagem deste assunto é importante, pois neste trabalho há o contato direto do material plástico com o concreto das vigas e analisar trabalhos já realizados, bem como, conhecer as características dos materiais utilizados ajudam no desenvolvimento dos experimentos. Também será abordado o cisalhamento em vigas, o ensaio de Stuttgart e um trabalho realizado com características semelhantes.

2.1 - Caracterização dos plásticos e garrafas PET

Segundo Piva & Wiebeck (2004) a palavra plástico vem do grego e significa “adequado a moldagem” e assim como a palavra “metal” não difere o ferro do alumínio, “plástico” não se refere a um único material. Segundo Mano *et al.* (2005) os plásticos, as borrachas e as fibras são constituídos principalmente de polímeros, que são moléculas em cuja estrutura se encontram unidades químicas simples, repetidas denominadas meros. São moléculas muito grandes, macromoléculas, com peso molecular geralmente entre 10.000 e 100.000. Os monômeros são compostos químicos que reagem para formar polímeros por uma reação chamada polimerização.

De acordo com Mano *et al.* (2005), os polímeros podem ser classificados em dois grandes grupos quanto a o seu comportamento quando aquecidos:

- a) Termoplásticos: os que fundem por aquecimento e solidificam por resfriamento, reversivelmente, por exemplo, o polietileno e o poli teraftalato de etileno (PET).
- b) Termorrígidos: aqueles que, por aquecimento, sofrem reações químicas e se transformam em massa insolúvel e infusível, como a resina fenólica e a borracha vulcanizada. Esses são os termorrígidos químicos. Há também matérias do tipo termorrígidos físicos, em que as ligações intermoleculares são hidrogênicas, como e o caso da celulose do papel.

Segundo Mano *et al.* (2005), O comportamento mecânico é também uma forma bastante utilizada para classificar os polímeros:

- a) borrachas ou elastômeros, matérias que a temperatura ambiente, exibem elevada elasticidade, suportando grandes deformações sem ruptura, com rápida e espontânea retração ao tamanho original.
- b) Plásticos: materiais que se tornam fluidos por ação da temperatura e podem ser moldados por pressão, tornam-se sólidos por resfriamento.
- c) Fibras: matérias que apresentam alta resistência mecânica e elevada razão entre as dimensões longitudinal e transversal.

Destes três tipos de matérias polímeros o plástico e que se encontra mais presentes no lixo, ocupa grande volume em relação ao peso, o que os torna mais visíveis como poluidores do meio ambiente. Segundo Piva & Wiebeck (2004), os termorrígidos apresentam 20% do total de plásticos consumidos no Brasil. Segundo a ABIPET (2015), o PET é o melhor e mais resistente plástico para fabricação de garrafas e embalagens para refrigerantes, águas, sucos, óleos comestíveis, medicamentos, cosméticos, produtos de higiene e limpeza, destilados, isotônicos, cervejas, entre vários outros como embalagens termo-formadas, chapas e cabos para escova de dente

2.1.1 - Os principais tipos de plásticos

A ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas estabelece através da norma NBR - 13230, simbologia a identificação dos termoplásticos utilizados na fabricação de embalagens e recipientes, facilitando a sua reciclagem. Considerou sete tipos de termoplásticos, a seguir:
Polietileno Tereftalato – PET: É utilizado em frascos de refrigerantes, de produtos de limpeza e farmacêuticos, em fibras sintéticas, etc..

Polietileno de Alta Densidade – PEAD: São utilizados na confecção de engradados para bebidas, garrafas de álcool e de produtos químicos, tubos para líquidos e gás, tanques de combustível, etc..

Policloreto de Vinila – PVC: São utilizados em tubos e conexões para água, calçados, encapamentos de cabos elétricos, equipamentos médico-cirúrgico, lonas, esquadrias e revestimentos, etc..

Polietileno de Baixa Densidade – PEBD: São empregados nas embalagens de alimentos, sacos industriais, sacos para lixo, filmes flexíveis, lonas agrícolas, etc.

Polipropileno – PP: Empregados em embalagem de massas alimentícias e biscoitos, potes de margarina, seringas descartáveis, equipamentos médico-cirúrgicos, fibras e fios têxteis, utilidades domésticas, autopeças, etc..

Poliestireno – OS: Usado em copos descartáveis, placas isolantes, aparelhos de som e de TV, embalagens alimentícias, revestimento de geladeiras, material escolar, etc..

Outros tipos de plásticos são as resinas plásticas não indicadas até aqui e são utilizadas em plásticos especiais na engenharia, em CDs, em eletrodomésticos, em corpo de computadores e em outras utilidades especiais.

2.1.2 - Caracterização de PET

Composto químico

Poliéstereno Tereftalato, ou PET, é um polímero termoplástico, desenvolvido por dois químicos britânicos Whinfield e Dickson em 1941, formado pela reação entre o ácido tereftálico e o etileno glicol, originando um polímero, termoplástico e cujas características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características das garrafas PET (Whinfield e Dickson, 1941)

Densidade	1,38 g/cm ³
Ponto de fusão	260 °C
Fórmula	(C ₁₀ H ₈ O ₄) _n
IUPAC	Poly (ethylene terephthalate)

2.1.3 - Sustentabilidade Ambiental

Segundo a ABIPET (2015) a Reciclagem de PET no Brasil é uma das mais desenvolvidas no mundo. Conta com alto índice de reciclagem e uma enorme gama de aplicações para o material reciclado, criando uma demanda constante e garantida. Desde 1994 a ABIPET procura mensurar este mercado e informar ao público sua atividade e desempenho. Também é tarefa da ABIPET estimular a reciclagem e o descarte adequado das embalagens pós-consumo, bem como oferecer as informações necessárias para que a indústria de embalagens possa produzir com a questão ambiental em foco, direcionada pela reciclabilidade das garrafas, frascos e outras embalagens de PET.

Atualmente, a indústria recicladora está estabelecida por todo território nacional, o que demandou uma nova atividade de pesquisa: *O Censo da Reciclagem de PET no Brasil* (Figura 1). Um estudo completo sobre este importante segmento industrial, gerador de empregos e que destina adequadamente uma grande quantidade de embalagens de PET pós-consumo. Através do censo, será possível ter um panorama bastante completo sobre o universo de empresas dedicadas à reciclagem do PET, número de empregos gerados, demandas para o produto reciclado e concentrações geográficas.

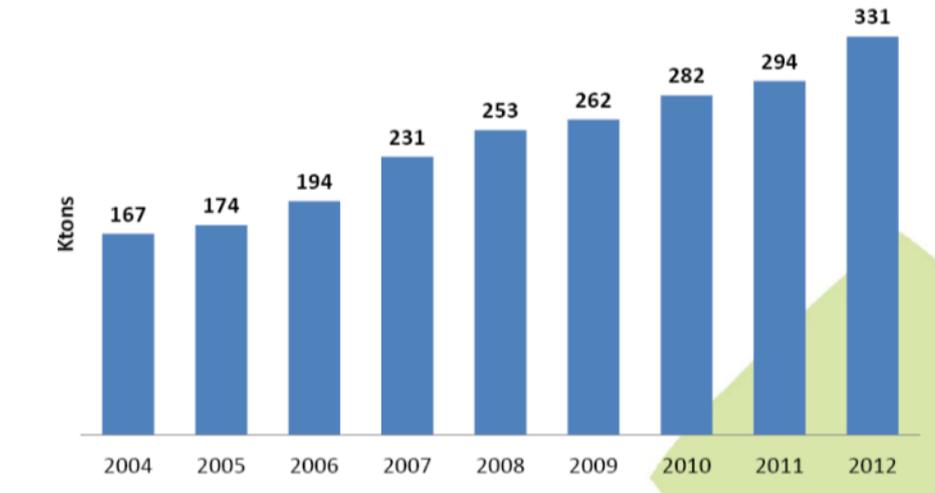


Figura 1 - Censo de reciclagem de garrafas PET no Brasil (ABIPET, 2015)

A Reciclagem de PET colabora para preservação ambiental, mas não só: a atividade alcança plenamente os três pilares do desenvolvimento sustentável:

Benefícios Sociais

Benefícios Econômicos

Benefícios Ambientais

A Reciclagem das embalagens de PET pós-consumo criou, em menos de 20 anos, todo um setor industrial. Essa indústria baseou-se, desde seu princípio, nas regras determinadas pelo próprio mercado: oferta e procura. Assim, ao criar e desenvolver aplicações para a matéria-prima resultante do processo de reciclagem das garrafas usadas, a Indústria do PET determinou uma forte demanda pela sucata.

2.1.3.1 - Benefícios Sociais

No Brasil – e em qualquer lugar do mundo onde a reciclagem do PET aconteça – a indústria têxtil é a maior usuária do insumo. Somente aqui, entretanto, a diversidade de usos permite que o valor pago pela sucata seja altamente atrativo o ano todo, o que mantém em atividade muitas empresas que comercializam o material, bem como inúmeras Cooperativas e

seus catadores, permitindo que a rentabilidade destas permaneça em patamares aceitáveis – garantindo remuneração justa aos trabalhadores e a despeito da ausência de sistemas de coleta seletiva.

2.1.3.2 - Benefícios Econômicos

A Indústria Recicladora do PET no Brasil é economicamente viável, sustentável e funcional. Basta citar que cerca de um terço do faturamento de toda a Indústria Brasileira do PET provém da reciclagem. Gera impostos, empregos, renda e todos os demais benefícios de uma indústria de base sólida. Seu crescimento anual constante, em média superior a 11% desde 2000, permite planejar novos investimentos – incrementados e incentivados pela criação de novos usos para o PET reciclado.

2.1.3.3 - Benefícios Ambientais

A produção e uso das garrafas em si já trazem vários benefícios para o meio ambiente. Sua reciclagem potencializa esses benefícios, pois a matéria-prima reciclada substitui material virgem em muitos outros produtos, nos segmentos mais diferentes, como construção civil, tintas, produção de automóveis e caminhões ou telefones celulares. Não bastasse o reaproveitamento de centenas de milhares de toneladas de embalagens que seriam indevidamente destinadas, a reciclagem de PET economiza recursos naturais, muita água e energia. A Figura 2 mostra o volume reciclado e o índice de reciclagem de garrafas PET no Brasil no período de 1994 a 2012. Segundo a ABIPET (2015) o 9º censo de reciclagem de garrafas PET indica a região Sudeste como a maior consumidora de garrafas PET conforme mostra a Figura 3.

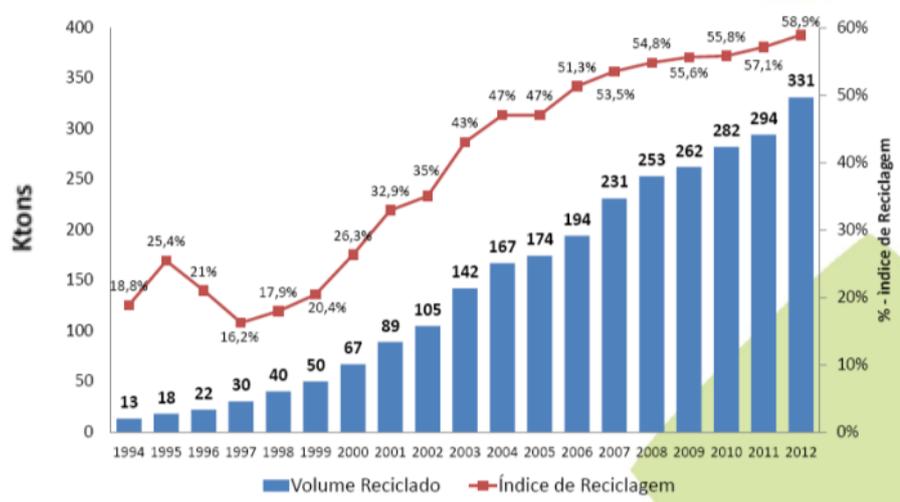


Figura 2 - Evolução do índice de reciclagem de garrafas PET no Brasil (ABIPET, 2015)

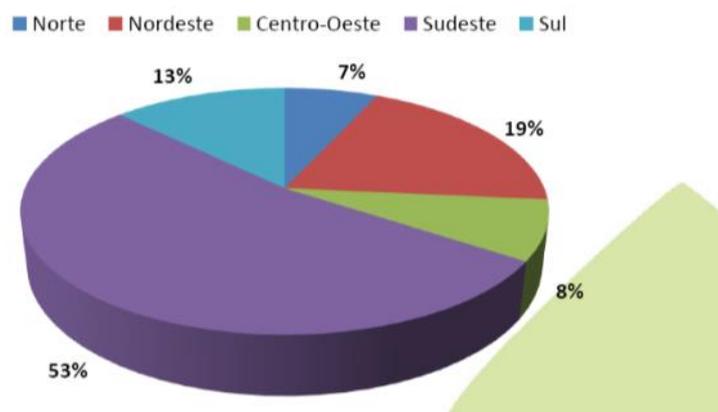


Figura 3 - Consumo de garrafas PET no Brasil por região (ABIPET, 2015)

2.2 - Alguns trabalhos já realizados utilizando garrafas PET

2.2.1 - Uso de garrafas de poli-tereftalato de etileno – PET como insumo alternativo na construção de edificações residenciais

O trabalho apresentado por Galli *et al.* (2014) no 1º SNCS – Seminário Nacional de Construções Sustentáveis em Passo Fundo/RS, cujo objetivo era apresentar uma alternativa de reutilização de garrafas de politereftalato de etileno (PET) na substituição dos blocos e tijolos da alvenaria tradicional, podendo auxiliar no incremento dos índices de reciclagem desse material possibilitando a produção de edificações residenciais de baixo custo, demonstrou que a compatibilização do baixo custo, minimização de impactos ambientais e aumento na qualidade de vida das pessoas, é possível, reduzindo cerca de 70% do custo na execução das paredes de uma residência, reduzindo o descarte de embalagens PET e resíduos de construção civil, minimizando a extração de recursos naturais para a produção de tijolos e blocos, criando a oportunidade de inclusão social pela construção da própria casa, criando a oportunidade de qualificação de mão-de-obra para a construção civil, possibilitando maior controle da saúde pública; enfim, melhorando a condição de vida. As Figuras de 4 e 5 mostram o projeto de montagem dos blocos, bem como os materiais utilizados na fabricação e as Figuras 6 e 7 mostram os blocos já executados e seccionados para verificação das garrafas PET dentro dos blocos. São utilizados arame para estruturar as garrafas na formação da parede, argamassa (mistura de cimento, areia e água) para unir solidamente as unidades e ajudá-las a resistir os esforços laterais, distribuir uniformemente as cargas atuantes, absorver as deformações naturais e selar as juntas contra a penetração água de chuva.

As paredes são moldadas dentro de fôrmas de madeira. As garrafas são preenchidas com areia ou entulho e assentadas em camadas intercaladas com argamassa e os acabamentos de reboco e pintura podem ser realizados logo em seguida. O entulho utilizado para o preenchimento das garrafas foi triturado com pilão de concreto e peneirado em peneira comum de obra.

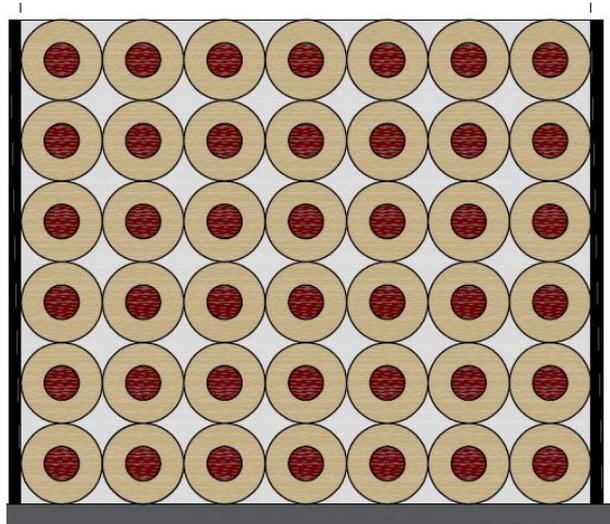


Figura 4 - Esquema da montagem dos blocos utilizando garrafas PET (Galli *et al.*,2014)

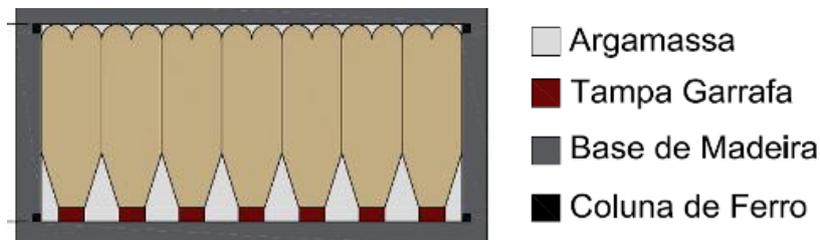


Figura 5 - Legenda e posicionamento dos materiais (Galli *et al.*,2014)



Figura 6 - Vista frontal do bloco utilizando garrafas PET (Galli *et al.*,2014)



Figura 7 - Vista lateral do bloco utilizando garrafas PET (Galli *et al.*,2014)

2.2.2 - Empresa do Rio Grande do Norte lança projeto de construção de casas com garrafa PET

A empresa idealizada por Gomes (2014) apresentou como alternativa para construção de casas populares a utilização de garrafas PET. As garrafas são preenchidas com areia, terra, pedras, água, lixo (papéis, plásticos, embalagens, que, depois de limpas são prensadas dentro da garrafa) aumentando sua resistência. Depois de organizadas em forma de parede, chão ou laje, basta dar o acabamento com cimento ou mesmo barro. A empresa trabalha em parceria com as cooperativas de catadores de lixo que vendem o material reciclável para a empresa. As figuras de 8 a 11 mostram os trabalhos realizados. O projeto já construiu 40 casas no Brasil.

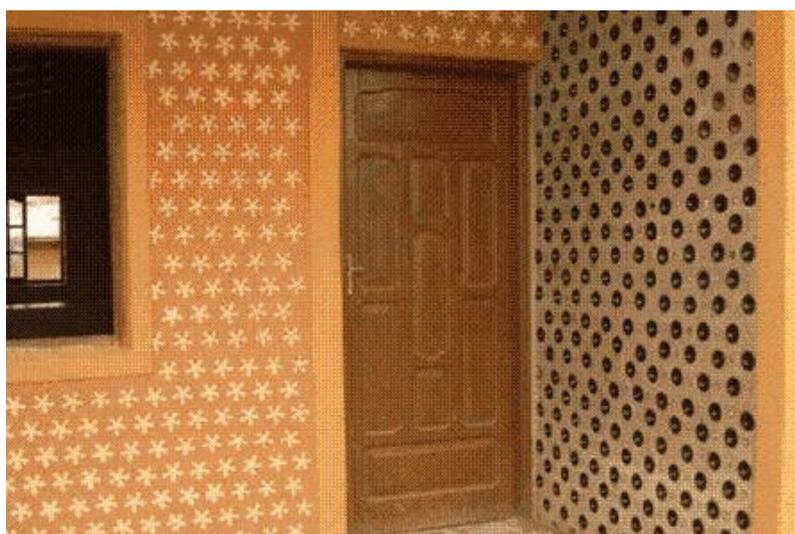


Figura 8 - Construção de casas utilizando garrafas PET (Gomes,2014)

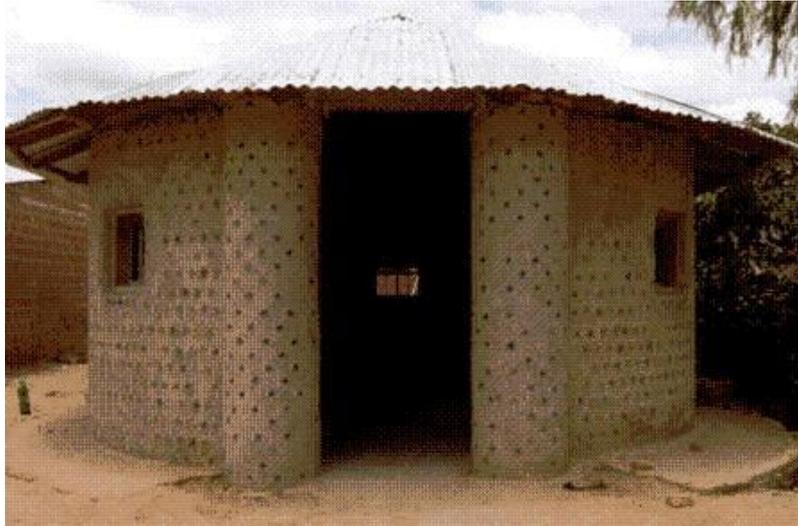


Figura 9 – Outro modelo de casa utilizando garrafas PET (Gomes,2014)

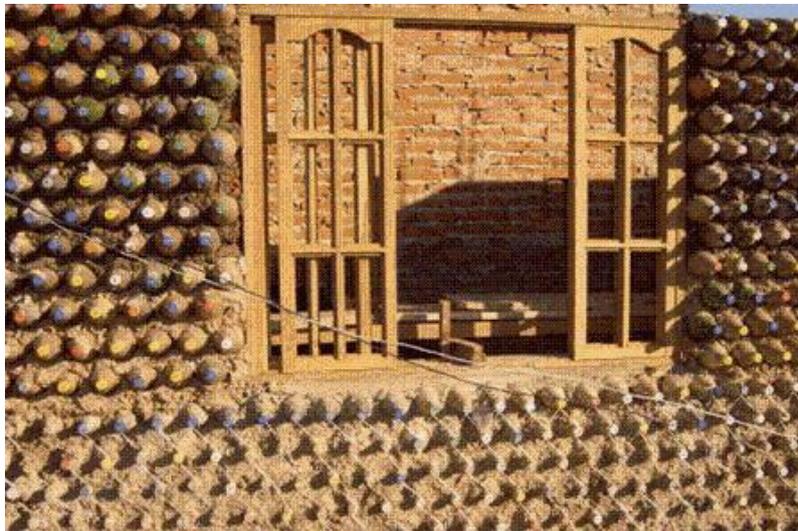


Figura 10 – Casa utilizando garrafas PET em fase de construção (Gomes,2014)



Figura 11 - Construção de lajes pré-moldadas utilizando garrafas PET (Gomes,2014)

2.2.3 - ECO ARK: Edifício em Taiwan feito com garrafas de plástico

O edifício Eco Ark (Figura 12), foi projetado para resistir a tufões e terremotos, terá 130 metros de comprimento, 40 metros de largura e 26 metros de altura, e utilizará 1,5 milhão de garrafas de plástico recicladas, de acordo com Huang (2012). A construção será utilizada como centro de exposições, e será pioneiro no mundo. Segundo Huang (2012), ninguém no mundo construiu um centro de exposições com garrafas de plástico. O edifício, chamado Eco Ark, que custará US\$ 4,22 milhões, inclui um anfiteatro, um museu e uma cortina de água que provém da chuva e dos sistemas de ar condicionado. Sua estrutura foi feita unicamente de Polli-Bricks. Lembrando uma colmeia de abelhas, mas feita de “tijolos” de garrafas plásticas recicladas. O Polli-Brick não é feito do formato das garrafas PET que conhecemos, pois, o desenho da garrafa foi modificado para um perfeito encaixe, criando detalhes intertravados entre elas permitindo o encaixe das células chamado “brick cell”.

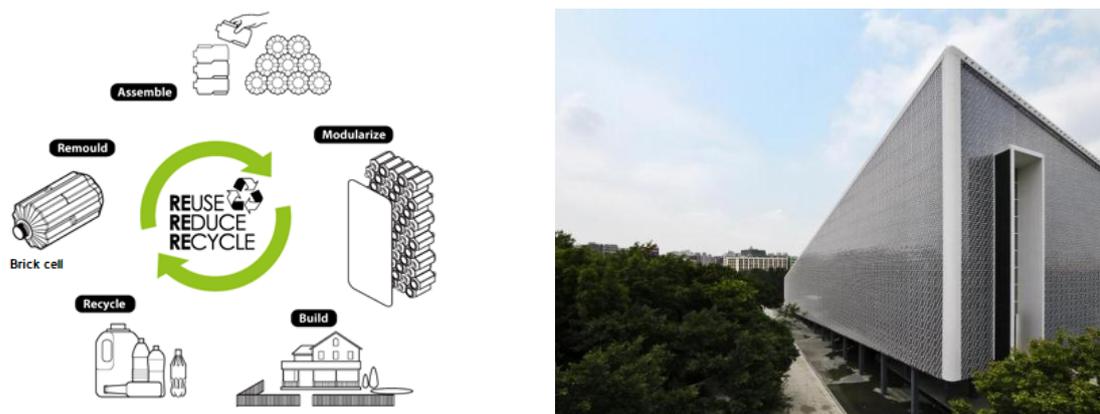


Figura 12 – Polli-bricks e o Edifício Eco Ark (Huang, 2012)

2.2.4 - Rio-Galeão substitui concreto por esferas plásticas na construção do novo estacionamento

Quatro novos andares de estacionamento do terminal 2 estão sendo construídos com BubbleDeck, tecnologia inovadora e sustentável para o RIO-Galeão. Com investimento de R\$ 57 milhões, a construção do Edifício Garagem do Terminal 2 do Aeroporto Internacional Tom Jobim, que ganhará quatro novos pisos e mais de 2 mil novas vagas, conta com um sistema inovador e sustentável. Com o objetivo de reduzir o peso próprio das lajes, proporcionar mais agilidade e menor custo e impacto ambiental durante a fase de construção, o RIO-Galeão adotou a tecnologia BubbleDeck, que utiliza as esferas de plástico no lugar do concreto que, neste caso, não desempenha a função estrutural. Dessa forma, a quantidade de concreto utilizada na obra é 25% menor e as lajes construídas, mais leves, porém com a mesma

resistência de uma laje maciça. As obras de melhoria da infraestrutura do aeroporto, que incluem os novos andares de estacionamento, são de responsabilidade do Consórcio Construtor Galeão, liderado pela Odebrecht Infraestrutura. O sistema é composto por esferas de polipropileno (resinas termoplásticas recicláveis), que reduzem a emissão de CO_2 , em média, em 46 kg por m^2 de laje construída, inseridas de forma uniforme entre duas telas de aço conforme mostra a Figura 13.

De acordo com Moreira (2014) esse processo traz velocidade na execução da laje e simplificação dos materiais empregados, quando comparados com metodologias convencionais. Além de ser um projeto sustentável, conta com processos mais eficientes de produção. Com isso, os riscos de acidentes de trabalho são diminuídos e torna-se mais eficaz a gestão da segurança dos agentes envolvidos na atividade.



Figura 13 - Montagem da estrutura com BubbleDeck (Moreira,2014)

Os trabalhos acima citados mostram experiências bem sucedidas da utilização de garrafas PET ou materiais plásticos em construção civil que podem viabilizar este experimento, apesar de não haver outros trabalhos com os mesmos parâmetros do apresentado nesta dissertação.

2.3 - Cisalhamento em vigas

2.3.1 - Comportamento resistente

Segundo Pinheiro *et al.* (2010), considerando uma viga bi-apoiada (Figura 14) submetida a duas forças F iguais e equidistantes dos apoios, armada com barras longitudinais

tracionadas e com estribos, para resistir os esforços de flexão e de cisalhamento, respectivamente. A armadura de cisalhamento poderia também ser constituída por estribos associados a barras longitudinais curvadas (barras dobradas). Essas barras dobradas, também conhecidas como cavaletes, eram comuns até os anos 1970 e não são mais usadas atualmente, principalmente por razões construtivas. Para pequenos valores da força F , enquanto a tensão de tração for inferior à resistência do concreto à tração na flexão, a viga não apresenta fissuras, ou seja, as suas seções permanecem no *Estádio I*. Nessa fase, origina-se um sistema de tensões principais de tração e de compressão. Com o aumento do carregamento, no trecho de momento máximo (entre as forças), a resistência do concreto à tração é ultrapassada e surgem as primeiras fissuras de flexão (verticais). Nas seções fissuradas a viga encontra-se no *Estádio II* e a resultante de tração é resistida exclusivamente pelas barras longitudinais. No início da fissuração da região central, os trechos junto aos apoios, sem fissuras, ainda se encontram no *Estádio I*.

Continuando o aumento do carregamento, surgem fissuras nos trechos entre as forças e os apoios, as quais são inclinadas, por causa da inclinação das tensões principais de tração σ_I (fissuras de cisalhamento). A inclinação das fissuras corresponde aproximadamente à inclinação das trajetórias das tensões principais, isto é, aproximadamente perpendicular à direção das tensões principais de tração. Com carregamento elevado, a viga, em quase toda sua extensão, encontra-se no *Estádio II*. Em geral, apenas as regiões dos apoios permanecem isentas de fissuras, até a ocorrência de ruptura na região central da viga. A Figura 14 mostra a evolução da fissuração de uma viga de seção T, para vários estágios de carregamento.

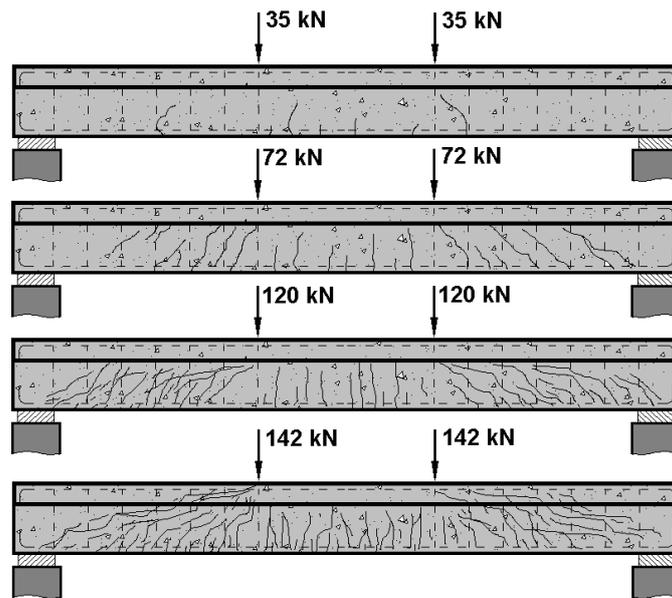


Figura 14 - Evolução da fissuração (Pinheiro *et al.*, 2010)

2.3.2 - Modelo de treliça

O modelo clássico de treliça foi idealizado por Ritter e Morsch, no início do século XX, e se baseia na analogia entre uma viga fissurada e uma treliça. Considerando uma viga bi-apoiada de seção retangular, Morsch admitiu que, após a fissuração, seu comportamento é similar ao de uma treliça como a mostrada na Figura 15, formada pelos elementos:

- banzo superior → cordão de concreto comprimido;
- banzo inferior → armadura longitudinal de tração;
- diagonais comprimidas → bielas de concreto entre as fissuras;
- diagonais tracionadas → armadura transversal (de cisalhamento).

A Figura 15 mostra a armadura transversal com inclinação de 90°, formada por estribos.

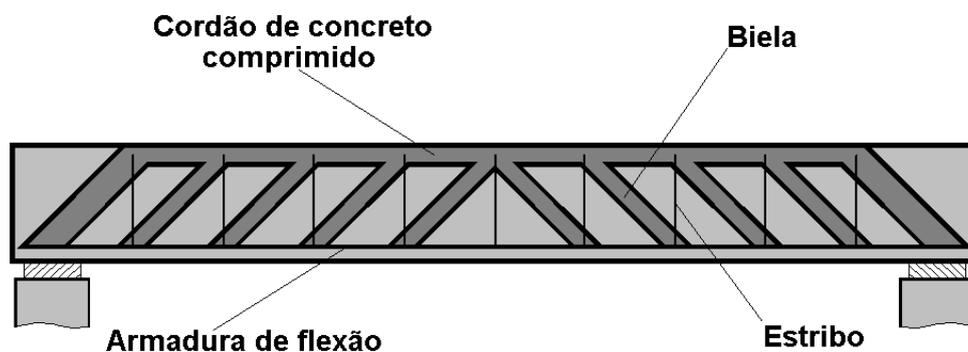


Figura 15 - Analogia de treliça (Pinheiro *et al.*, 2010)

Essa analogia de treliça clássica considera as seguintes hipóteses básicas:

- fissuras, portanto, as bielas de compressão, com inclinação de 45°;

- banzos paralelos;
- treliça isostática, portanto, não há engastamento nos nós, ou seja, nas ligações entre os banzos e as diagonais;
- armadura de cisalhamento com inclinação entre 45° e 90° .

Porém, resultados de ensaios comprovam que há imperfeições na analogia de treliça clássica. Isso se deve principalmente a três fatores:

- a inclinação das fissuras é menor que 45° ;
- os banzos não são paralelos; há o arqueamento do banzo comprimido, principalmente nas regiões dos apoios;
- a treliça é altamente hiperestática; ocorre engastamento das bielas no banzo comprimido, e esses elementos comprimidos possuem rigidez muito maior que a das barras tracionadas.

Para um cálculo mais refinado, tornam-se necessários modelos que considerem melhor a realidade do problema. Por esta razão, como modelo teórico padrão, adota-se a analogia de treliça, mas a este modelo são introduzidas correções, para levar em conta as imprecisões verificadas.

2.3.3 - Modos de Ruína

Numa viga de concreto armado submetida a flexão simples, vários tipos de ruína são possíveis, entre as quais: ruínas por flexão; ruptura por falha de ancoragem no apoio, ruptura por esmagamento da biela, ruptura da armadura transversal, ruptura do banzo comprimido devida ao cisalhamento e ruína por flexão localizada da armadura longitudinal.

a) Ruínas por flexão

Nas vigas dimensionadas nos domínios 2 ou 3, a ruína ocorre após o escoamento da armadura, ocorrendo abertura de fissuras e deslocamentos excessivos (flechas), que servem como “aviso” da ruína. Nas vigas dimensionadas no Domínio 4, a ruína se dá pelo esmagamento do concreto comprimido, não ocorrendo escoamento da armadura nem grandes deslocamentos, o que caracteriza uma “ruína sem aviso”.

b) Ruptura por falha de ancoragem no apoio

A armadura longitudinal é altamente solicitada no apoio, em decorrência do efeito de arco. No caso de ancoragem insuficiente, pode ocorrer o colapso na junção da diagonal comprimida com o banzo tracionado, junto ao apoio. A ruptura por falha de ancoragem ocorre bruscamente, usualmente se propagando e provocando também uma ruptura ao longo da altura útil da viga. O deslizamento da armadura longitudinal, na região de ancoragem, pode causar ruptura por cisalhamento da alma. A rigor, esse tipo de ruptura não decorre da força cortante, mas sim da falha na ancoragem do banzo tracionado na diagonal comprimida, nas proximidades do apoio.

c) Ruptura por esmagamento da biela

No caso de seções muito pequenas para as solicitações atuantes, as tensões principais de compressão podem atingir valores elevados, incompatíveis com a resistência do concreto à compressão com tração perpendicular (estado duplo). Tem-se, então, uma ruptura por esmagamento do concreto (Figura 16). A ruptura da diagonal comprimida determina o limite superior da capacidade resistente da viga à força cortante, limite esse que depende, portanto, da resistência do concreto à compressão.

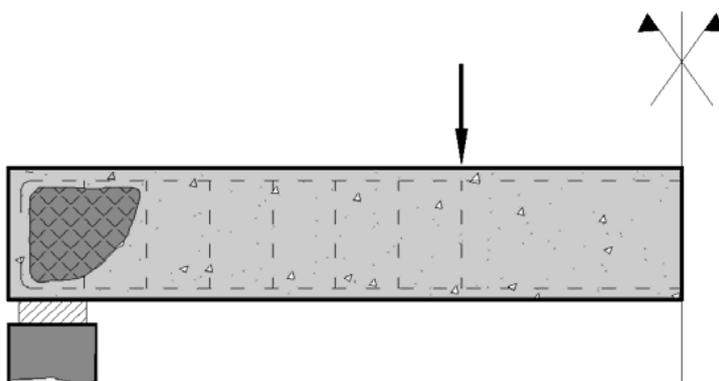


Figura 16 - Ruptura por esmagamento da biela (Pinheiro *et al.*, 2010)

d) Ruptura da armadura transversal

Corresponde a uma ruína por cisalhamento, decorrente da ruptura da armadura transversal (Figura 17). É o tipo mais comum de ruptura por cisalhamento, resultante da deficiência da armadura transversal para resistir às tensões de tração devidas à força cortante, o que faz com que a peça tenha a tendência de se dividir em duas partes. A deficiência de armadura transversal pode acarretar outros tipos de ruína, que serão descritos nos próximos itens.

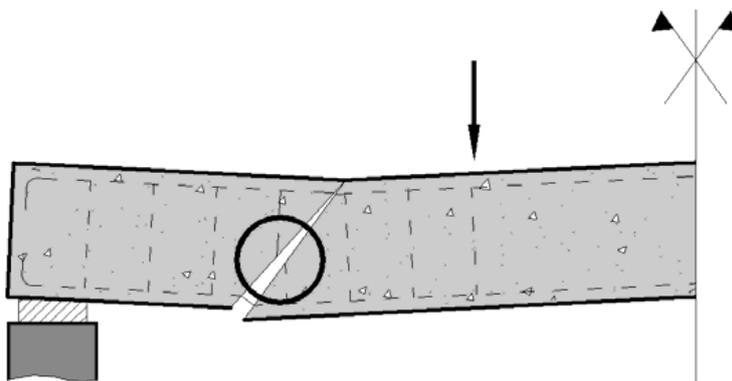


Figura 17 - Ruptura da armadura transversal (Pinheiro *et al.*, 2010)

e) Ruptura do banzo comprimido devida ao cisalhamento

No caso de armadura de cisalhamento insuficiente, essa armadura pode entrar em escoamento, provocando intensa fissuração (fissuras inclinadas), com as fissuras invadindo a região comprimida pela flexão. Isto diminui a altura dessa região comprimida e sobrecarrega o concreto, que pode sofrer esmagamento, mesmo com momento fletor inferior àquele que provocaria a ruptura do concreto por flexão (Figura 18).

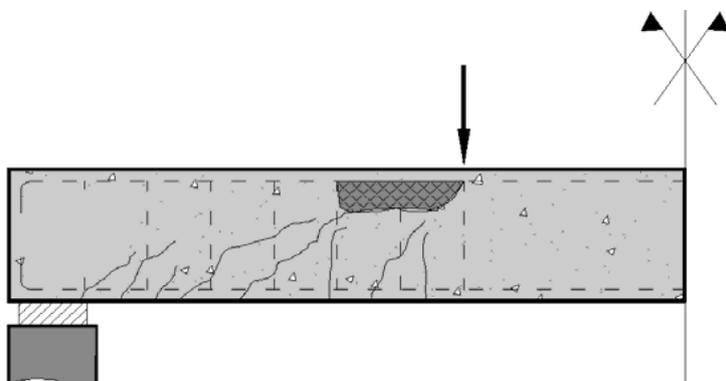


Figura 18 - Ruptura do banzo comprimido, decorrente do esforço cortante (Pinheiro *et al.*, 2010)

f) Ruína por flexão localizada da armadura longitudinal

A deformação exagerada da armadura transversal pode provocar grandes aberturas das fissuras de cisalhamento. O deslocamento relativo das seções adjacentes pode acarretar na flexão localizada da armadura longitudinal, levando a viga a um tipo de ruína que também decorre do cisalhamento (Figura 19).

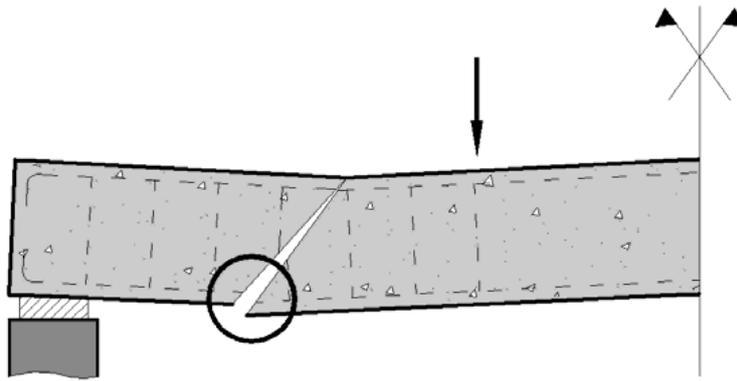


Figura 19 - Ruína por flexão localizada da armadura longitudinal (Pinheiro *et al.*, 2010)

2.4 - Ensaio de Stuttgart

2.4.1 - Histórico

Segundo Chaer & Oliveira (2001), a partir de 1867, Monier obteve patentes para a construção de tubos, lajes e pontes, tendo êxito na execução de diversas obras em concreto armado, mesmo sem qualquer fundamentação científica, por métodos puramente empíricos. Anos depois, em 1902, E. Mörsch elabora os primeiros textos teóricos sobre comportamento estrutural de peças em concreto armado, com especial enfoque para vigas prismáticas de seção retangular.

Após a compra dos direitos, pela Alemanha, da patente Monier, a empresa – que futuramente seria mundialmente conhecida por “Wayss & Freitag” – passou a impulsionar os primeiros ensaios de laboratório em peças de concreto armado. Estes experimentos foram realizados inicialmente pelos pesquisadores Leonhardt e Walther, o que ficou conhecido como “Ensaio de Stuttgart”.

Com os resultados dos “Ensaio de Stuttgart”, comprovou-se experimentalmente a primeira teoria cientificamente consistente, que são as ideias fundamentais de Mörsch (Teoria Clássica de Mörsch) e, logo em seguida, surgem as primeiras redações de normas para o cálculo e construção em concreto armado, o que fez com que a utilização deste material iniciasse a conquista de um mercado em todo o mundo. Consequentemente, os estudos do Concreto Armado (dimensionamento, detalhamento e execução) foram amplamente explorados, gerando prescrições e recomendações cada vez mais precisas e melhor elaboradas, em função dos avanços que a evolução tecnológica tem propiciado para o homem.

2.4.2 - Fundamentação Teórica – Modelo Experimental

O ensaio consiste no carregamento gradativo de uma viga retangular bi-apoiada (convenientemente dimensionada pela teoria clássica de Morsch), com duas cargas concentradas simétricas conforme o esquema mostrado na Figura 20.

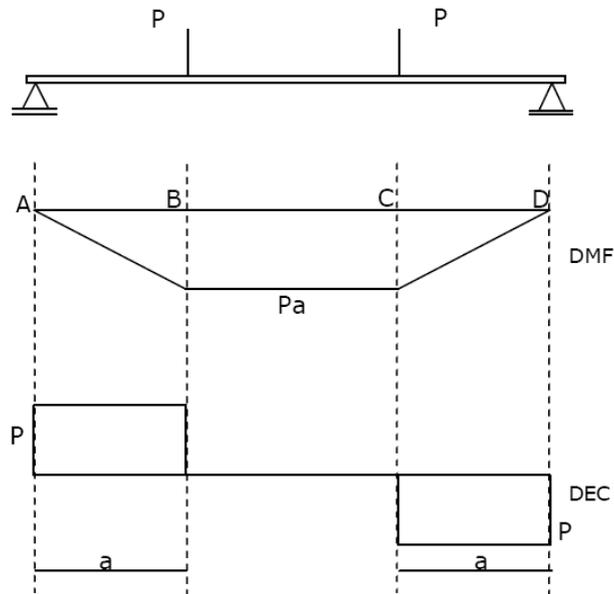


Figura 20 - Carregamento com duas cargas concentradas (Chaer & Oliveira,2001)

O carregamento é aumentado até que venha a atingir o valor que leve a viga à ruptura, permitindo, numa mesma peça, a observação da *flexão pura* (sem a presença do cisalhamento) no trecho BC e da *flexão simples* (com a presença do cisalhamento) nos trechos AB e CD. Num primeiro estágio de carregamento, a viga não apresenta fissuras, pois o concreto da fibra inferior não atingiu a tensão de ruptura à tração. Os pontos da peça não fissurada estão sob estado plano de tensões, com as trajetórias de tensões principais de tração e de compressão mostradas na Figura 21.

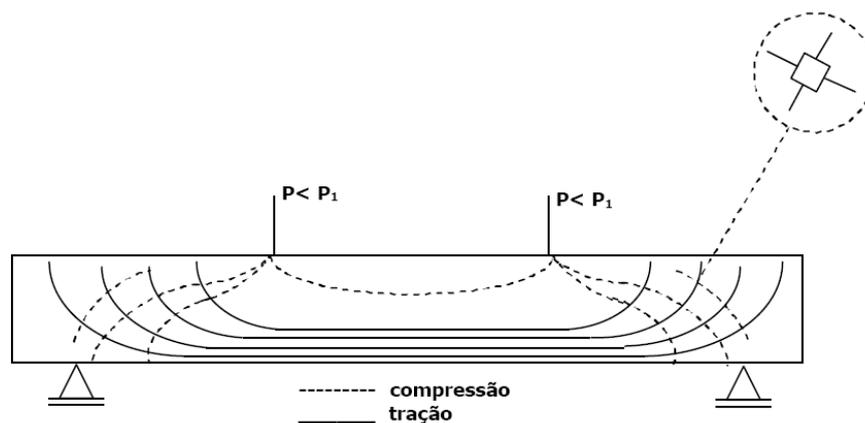


Figura 21 - Trajetórias principais de tração e compressão (Chaer & Oliveira,2001)

Com o aumento da carga, a tensão de ruptura à tração é atingida no trecho central e começam a aparecer as primeiras fissuras verticais que se estendem até pouco abaixo da linha neutra. Nesta fase os esforços de tração são absorvidos pela armadura. No início deste estágio, nos trechos extremos o concreto não atinge a tensão de ruptura, mas o aumento progressivo da carga, até o colapso, forçará toda a viga a trabalhar fissurada, com exceção de regiões muito pequenas, próximas aos apoios. Neste trecho, em presença das tensões cisalhantes, as fissuras são inclinadas (Figura 22).

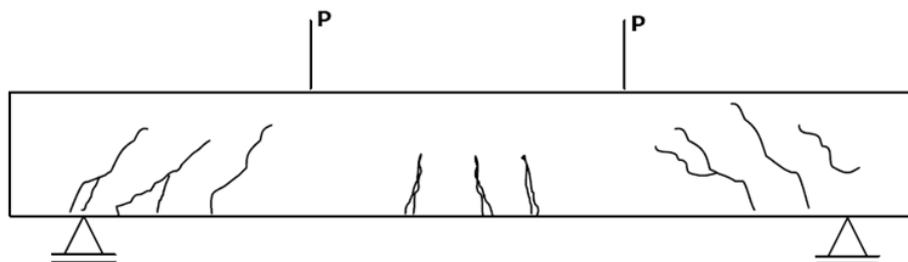


Figura 22 - Presença de tensões cisalhantes (Chaer & Oliveira,2001)

O panorama de fissuração da peça ao atingir o estado limite último pode ser muito diferente daquele que poderia se prever da análise das trajetórias de tensões elásticas, pois depende do arranjo para a distribuição das armaduras (Figura 23).

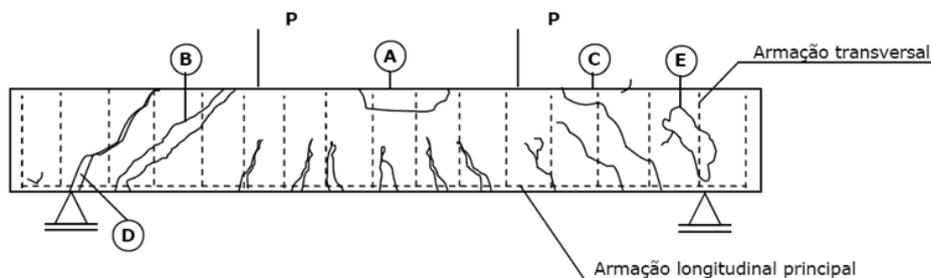


Figura 23 - Panorama de fissuração (Chaer & Oliveira,2001)

Em princípio existiriam duas possibilidades para o arranjo das armaduras. Uma primeira, teoricamente possível, é baseada na idéia da substituição local de material, onde barras de armadura seriam distribuídas por todo volume da peça estrutural, de modo que ao se abrir uma fissura já existiria uma armadura capaz de absorver a tração liberada do concreto. Neste caso, a distribuição dos esforços internos seguiria o mesmo padrão de antes da fissuração. Porém, nada garante que este arranjo seja o mais eficiente para a segurança em relação aos estados limites e nem o mais econômico.

A segunda, baseia-se no fato de que uma parte das barras de aço é mais bem aproveitada quando empregada de forma concentrada, em posições preferenciais da estrutura. Este é o princípio dos arranjos de armaduras padronizadas, estabelecidas de acordo com modelos nos estados limites últimos das peças estruturais. Estes modelos devem sempre garantir a estabilidade, global e local, da peça. Para o trecho central da viga, onde as seções transversais estão solicitadas à flexão pura, o modelo típico consiste de seções resistentes formadas por um banzo comprimido de concreto e um banzo tracionado correspondente à armadura longitudinal disposta junto à face inferior. Para os trechos extremos, sob flexão não uniforme, o modelo idealizado é o de uma treliça, que considera a interação entre o momento fletor e a força cortante. A treliça tem banzos longitudinais, comprimidos e tracionados, como no trecho central, ligados por diagonais comprimidas e tirantes. As diagonais comprimidas, ditas bielas, representam o concreto entre as fissuras. Os tirantes, verticais ou inclinados, representam a armadura transversal da viga, completando o esquema estático da treliça e costurando as fissuras (Figura 24).

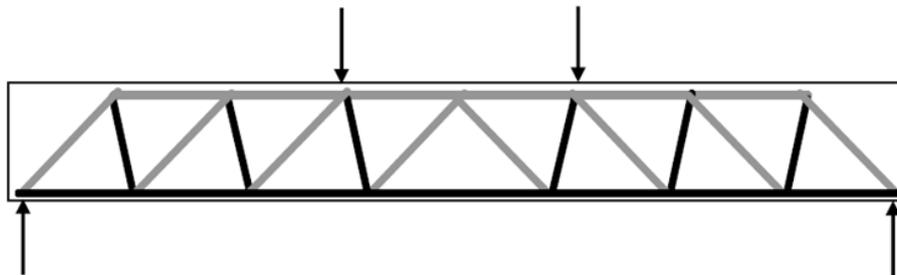


Figura 24 - Modelo de Treliça (Chaer & Oliveira,2001)

Em vigas submetidas a força cortante, independente do valor da resistência à compressão do concreto, após a formação das fissuras de cisalhamento surgem mecanismos internos resistentes. Basicamente, estes mecanismos podem ser agrupados em três: o efeito de pino da armadura longitudinal, o atrito entre as superfícies das fissuras de cisalhamento e a contribuição da zona comprimida acima da linha neutra. Estas três parcelas juntas formam a chamada contribuição do concreto na resistência ao cisalhamento. O efeito de pino é relacionado à taxa de armadura longitudinal, enquanto que os outros dois fatores estão diretamente ligados a resistência à compressão do concreto. A literatura técnica mostra que parâmetros geométricos também afetam a resistência ao cisalhamento (MacGregor & Wight, 2009). Conforme apresentado por Leonhardt (1982), a relação entre a distância do ponto de aplicação da carga, (a), e a altura útil da viga, (d), influenciam no tipo de ruptura da viga e na

capacidade resistente. Para vigas com baixa relação a/d a ruptura ocorre de modo brusco, com um esforço cortante que excede o valor relativo ao surgimento de fissuras. Enquanto que, para valores elevados de a/d , a ruptura acontece imediatamente após o surgimento das fissuras de cisalhamento e sem esmagamento do concreto. Outros fatores geométricos, como a altura da viga, também influem na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto.

2.5 - Trabalho semelhante realizado

2.5.1 - Rodrigues *et al.* (2014)

Trabalho apresentado no IBRACON 2014. No seu programa experimental foram ensaiadas 6 vigas de concreto armado de 2200 mm de comprimento, sendo duas delas de seção retangular maciça de (120 x 400) mm² para referência e quatro vigas com seção vazada, com 120 mm de largura, 400 mm de altura e uma área vazada retangular concêntrica de (50 x 240) mm². As vigas foram divididas em duas séries, sendo que na primeira as vigas foram submetidas ao ensaio de Stuttgart e na segunda série as vigas foram submetidas a um carregamento centrado por meio de um pilar de concreto armado de seção (120 x 300) mm² moldado monoliticamente às vigas. O concreto utilizado para a moldagem das vigas foi dosado para uma resistência à compressão de 30 MPa aos 28 dias e um abatimento de 120 ± 20 mm. A Tabela 2 apresenta as características das vigas ensaiadas e a Figura 25 mostra a seção das vigas.

Tabela 2 - Características das vigas ensaiadas (Rodrigues *et al.*, 2014)

Modelo	bw (mm)	d (mm)	ρ (%)	Modelo de Ensaio	Seção do Pilar (mm ²)
VSR	120	378,75	0,77	Ensaio de Stuttgart	Sem pilar
VS1			1,02		
VS2			1,02		
VPR			0,77	Ensaio de carga centrada	36000
VP1			1,02		
VP2			1,02		

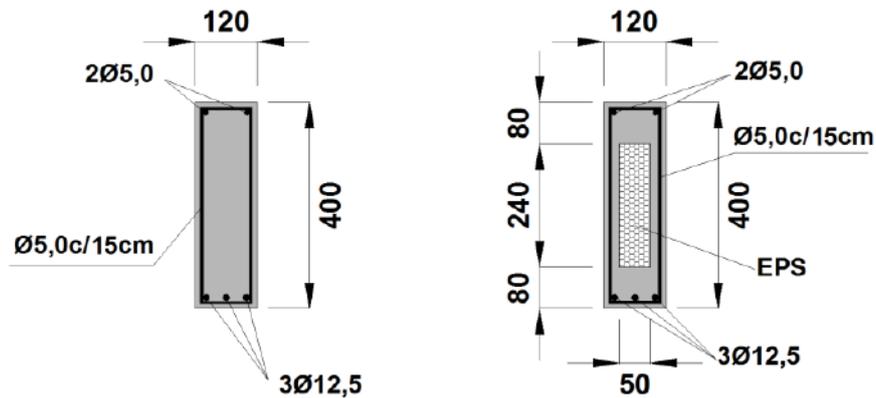


Figura 25 - Seção transversal das vigas (Rodrigues *et al.*, 2014)

2.5.1.1 - Cargas últimas e modos de ruptura observados

A determinação do modo de ruptura foi baseada no comportamento das vigas no momento da falha, observando-se as deformações da armadura de flexão e do concreto, deslocamentos verticais e fissuração. Quanto à carga última (P_u), foi considerada como a máxima carga registrada pela leitora da célula de carga. As vigas de referência foram os modelos que apresentaram maiores cargas de ruptura, sendo que a VPR teve ruptura característica por cisalhamento com ruptura dos estribos, enquanto que a VSR (figura 26) apresentou ruptura por flexão.

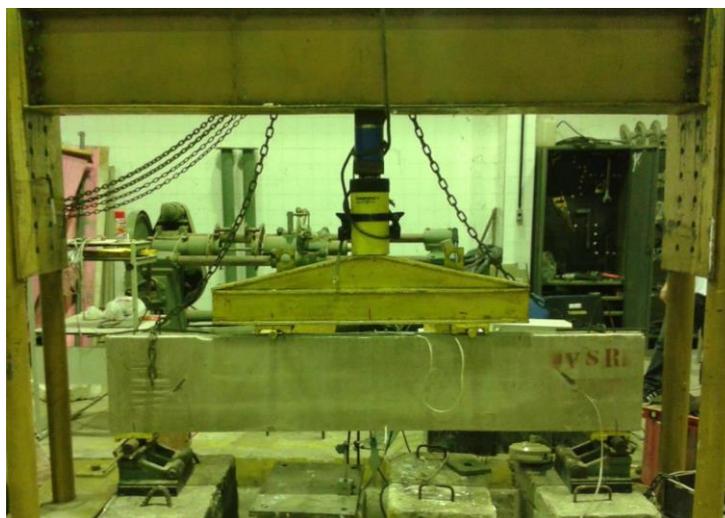


Figura 26 - Ensaio da viga VSR (Rodrigues *et al.*, 2014)

No caso das vigas com seção vazada, todas tiveram ruptura frágil, com exceção da VP1, que apresentou falha com o escoamento da armadura de flexão e resistiu a carregamentos muito próximos aos da viga de referência VPR. No geral as vigas se comportaram da maneira esperada e com cargas de ruptura próximas às estimadas teoricamente, com exceção da viga VSR que apresentou carga última muito acima do esperado. A Tabela 3 apresenta a carga

última (P_u) das vigas ensaiadas em comparação com as cargas características teóricas estimadas segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007).

Tabela 3 - Carga última (P_u) das vigas ensaiadas (Rodrigues *et al.*, 2014)

Viga	Modo de Ruptura	d (mm)	f_c' (MPa)	A_s (mm)	A_{sw}/m (mm ²)	P_u (kN)	P_{flex}^{NB1} (kN)	P_{cis}^{NB1} (kN)
VSR	Flexão	378,7	34,8	368,2	137,4	287	213,4	171,0
VS1	Cisalhamento				137,4	195	213,4	132,3
VS2	Cisalhamento				0,0	126	213,4	81,8
VPR	Cisalhamento				137,4	195	128,1	171,0
VP1	Flexão				137,4	186	128,1	132,3
VP2	Cisalhamento				0,0	117	128,1	81,8

Rodrigues *et al.* (2014) concluiu que a redução da área de concreto da seção não influenciou significativamente no comportamento das vigas quanto aos deslocamentos verticais. Por outro lado, a comparação das cargas de ruptura evidencia que as vigas vazadas apresentaram menor resistência ao esforço cortante que as vigas maciças. E ressaltou que as perdas de resistência variaram muito entre os elementos, sendo que entre as vigas VSR e VS1 houve uma diferença de aproximadamente 32%, enquanto que entre as vigas VPR e VP1 a variação foi de apenas 4%.

2.6 – Recomendações Normativas

2.6.1 - Resistência ao cisalhamento de acordo com a NBR 6118:2014

A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014), recomenda que as resistências de vigas submetidas ao cisalhamento sejam verificadas simultaneamente nas duas condições apresentadas pelas Equações 1 e 2.

$$V_{sd} \leq V_{Rd2} \quad (1)$$

$$V_{sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (2)$$

Onde,

V_{sd} é a força cortante solicitante de cálculo, na seção (kN);

V_{Rd2} é a força cortante resistente de cálculo referente à ruína das diagonais comprimidas de concreto (kN);

V_{Rd3} é a força cortante resistente de cálculo referente à ruína das diagonais tracionadas (kN), sendo V_c a contribuição do concreto (kN) e V_{sw} a parcela absorvida pela armadura transversal (kN).

Para a estimativa das forças resistentes de cálculo a norma sugere dois modelos de cálculo. O modelo de cálculo I admite uma inclinação das diagonais comprimidas de 45° em relação ao eixo longitudinal da viga e considera que a parcela V_c tenha valor constante independentemente de V_{sd} . As Equações 3 e 4 apresentam as forças resistentes de acordo com o modelo de cálculo I.

a) Verificação da compressão diagonal do concreto

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (3)$$

b) Cálculo da armadura transversal

$$V_{Rd3} = V_c + V_w \quad (4)$$

Onde,

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s}\right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\text{sen } \alpha + \text{cos } \alpha)$$

$$V_c = 0,09 \cdot f_{ck}^{2/3} \cdot b_w \cdot d \text{ (flexão simples e flexo - tração);}$$

b_w é a menor largura da seção (mm);

d é a altura útil da seção (mm).

O modelo de cálculo II admite uma inclinação das diagonais comprimidas variando entre 30° e 45°. Admite ainda que a parcela V_c sofra variação com o aumento de V_{sd} . As Equações 5 e 6 apresentam as forças resistentes de acordo com o modelo de cálculo II.

a) Verificação da compressão diagonal do concreto:

$$V_{Rd2} = 0,54 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \cdot \text{sen}^2 \theta \cdot (\text{cotg } \alpha + \text{cotg } \theta) \quad (5)$$

b) Cálculo da armadura transversal

$$V_{Rd3} = V_c + V_w \quad (6)$$

Onde,

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) \cdot 0,9d \cdot f_{ywd} \cdot (\cotg \alpha + \cotg \theta) \cdot \sen \alpha;$$

$$V_c = 0,09 \cdot f_{ck}^{2/3} \cdot b_w \cdot d, \text{ quando } V_{sd} \leq V_c \text{ (flexão simples e flexo - tração);}$$

$$V_c = 0, \text{ quando } V_{sd} = V_{Rd2}, \text{ interpolando-se linearmente para valores intermediários.}$$

b_w é a menor largura da seção (mm);

d é a altura útil da seção (mm).

CAPÍTULO 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 - Aplicação das expressões normativas para determinação das cargas de ruptura

Após a aplicação da norma e devidas equações para determinação das cargas de ruptura obteve-se os resultados apresentados na Tabela 4. Nota-se que há uma diferença muito grande entre os resultados obtidos nos modelos de cálculo. As planilhas de cálculo para obtenção dos resultados apresentados na Tabela 4 constam nos Anexos A1 a A4. Para cálculo das cargas de ruptura nas vigas V1, V2 e V3, foi deduzida da área de concreto (A_c) utilizada nas equações, a área vazada de cada linha de garrafa PET utilizada nas referidas vigas.

Tabela 4 – Resultados para as Cargas de Ruptura (NBR 6118:2014)

Vigas	V_{Rk} (kN)			P_{flex}
	Modelo de Cálculo I $\alpha=90^\circ$	Modelo de Cálculo II $\theta=30^\circ$	Modelo de Cálculo II $\theta=45^\circ$	
VR	169,0	225,2	236,3	194,4
V1	160,2	217,4	225,4	
V2	151,5	209,6	214,6	
V3	142,7	201,8	203,6	

3.1.1 - Valores empregados nas variáveis

Os valores empregados nas variáveis das equações são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Valores empregados nas variáveis

Variáveis	Valor	Variáveis	Valor
b_w	120,0 mm	A_{sw}	19,63 mm ²
h	400,0 mm	d	373,8 mm
a	750,0 mm	c	20,0 mm
L	2000,0 mm	s	200,0 mm
$f_{c,m}$	44,9 MPa	A_c Viga VR	44850,0 mm ²
f_{ys}	560,0 MPa	A_c Viga V1	41001,55 mm ²
f_{ywd}	583,0 MPa	A_c Viga V2	37153,1 mm ²
A_s	368,1 mm ²	A_c Viga V3	33304,65 mm ²

$$d = h - \left(\frac{\phi}{2} + c \right) = 373,8 \text{ mm}$$

Onde,

h é altura da viga (mm)

\emptyset é o diâmetro do aço (mm)

c é o cobrimento (mm)

3.2 - Armaduras, características das vigas e formas

As dimensões das garrafas PET (diâmetro = 70 mm e comprimento = 230 mm) influenciaram no dimensionamento das armaduras transversais, tanto na largura como também no espaçamento.

3.2.1 - Armaduras de flexão e cisalhamento

As armaduras de flexão foram compostas por 3 barras de aço CA50 com diâmetro de 12,5 mm. Como armadura de composição foram utilizados 2 ferros de 5,0 mm na região superior (comprimida da viga). A armadura de cisalhamento foi composta de 11 estribos de aço CA60 de 5,0 mm de diâmetro, espaçados a cada 200 mm. Este espaçamento foi atribuído em função do comprimento da garrafa PET. Caso o espaçamento da armadura transversal fosse maior que o comprimento da garrafa PET, a garrafa poderia deslocar-se para junto da forma, no momento da concretagem.

3.2.2 - Características das vigas

As vigas foram confeccionadas com seção de (120 x 400) mm² e 2200 mm de comprimento, sendo uma maciça para referência – Viga VR (Figura 27) e três delas com área vazada: a primeira Viga V1 (Figura 28) utilizando-se uma linha de garrafa PET de 600 ml deitada, a segunda Viga V2 (Figura 29) com duas linhas de garrafa PET deitadas (uma garrafa sobre a outra) e a terceira Viga V3 (Figura 30) com três linhas de garrafas em deitadas (também uma sobre a outra) todas dispostas longitudinalmente na viga. Foram utilizados espaçadores de 40 mm de altura para evitar o contato das garrafas PET com a armadura de flexão.

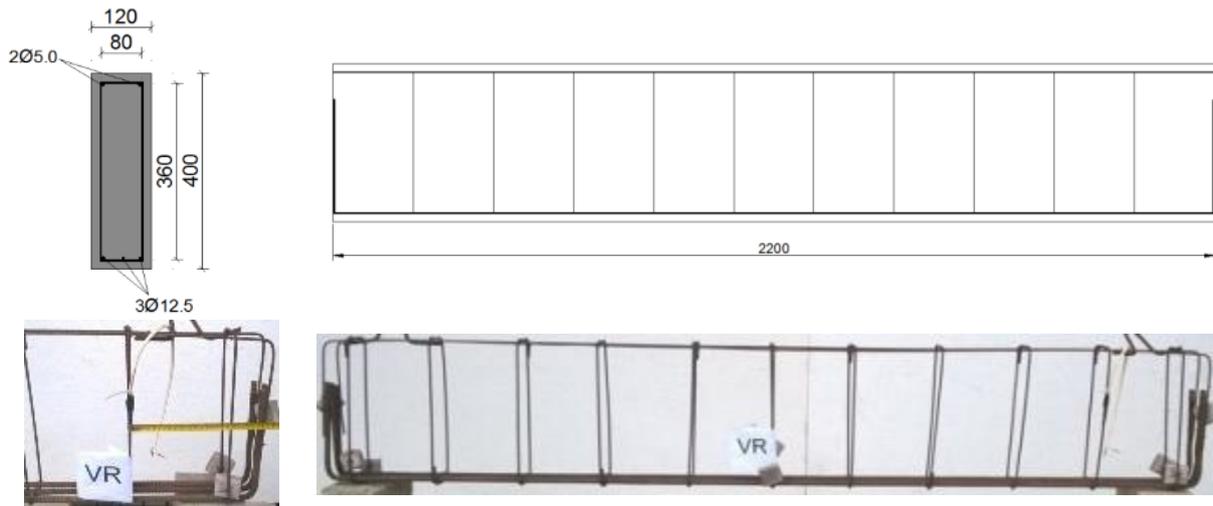


Figura 27 - Viga de Referência – VR

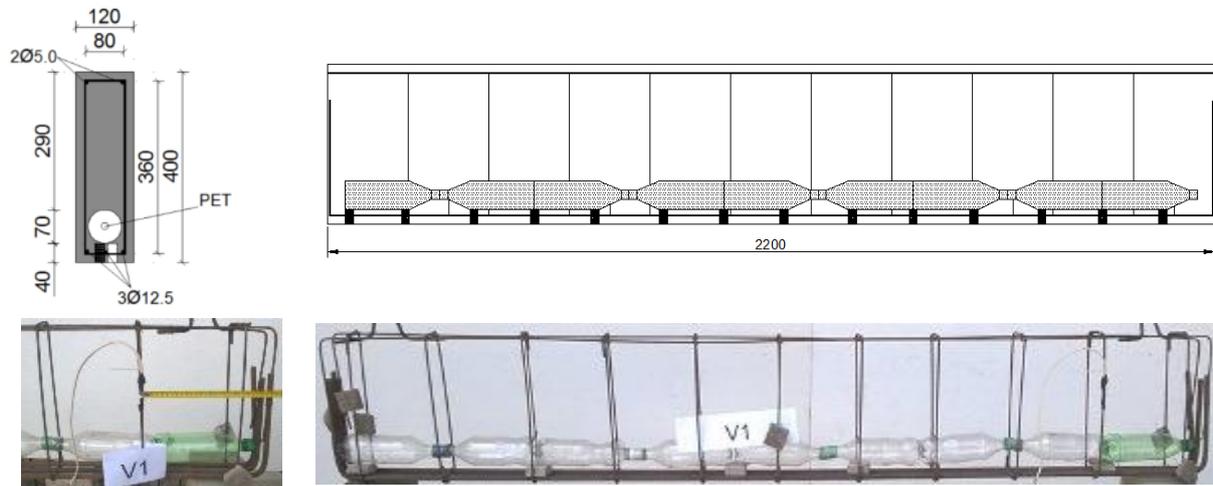


Figura 28 - Viga com uma linha de garrafa PET – V1

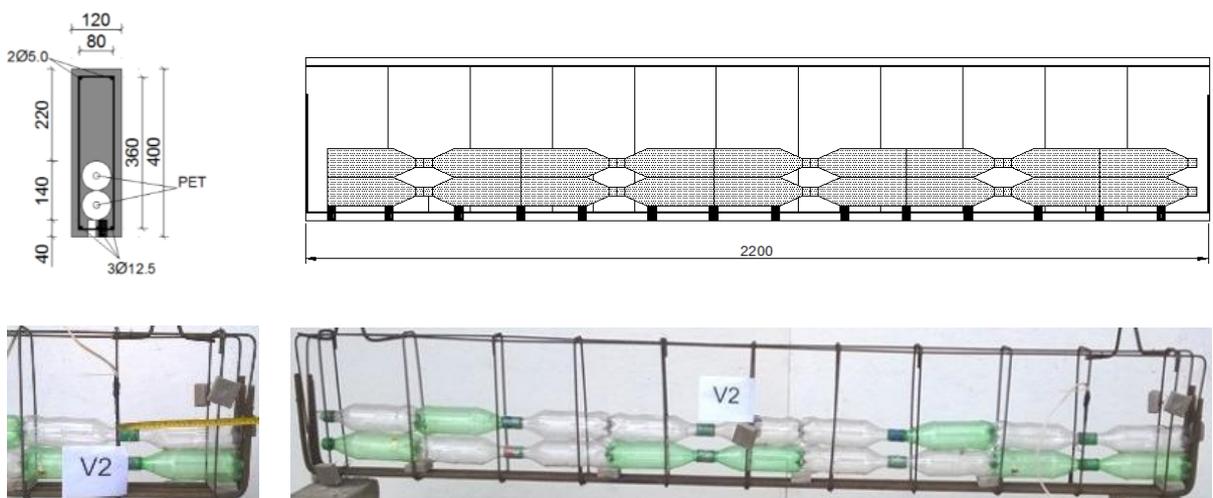


Figura 29 - Viga com duas linhas de garrafa PET – V2



Figura 30 - Viga com três linhas de garrafa PET – V3

A Tabela 6 apresenta a quantidade de garrafas PET's inseridas em cada viga, bem como, a economia de concreto e consequentemente a redução de peso. As figuras 31 e 32 mostram as formas das vigas e estas já concretadas. O peso das vigas foi calculado multiplicando-se o volume das vigas (após inserção das garrafas PET) pelo valor do peso específico do concreto que é igual a 2500,0 kg/m³. Para o cálculo do volume a ser deduzido em cada viga em virtude da inserção das garrafas PET, foi utilizado o volume de uma garrafa PET igual a 0,0006 m³ multiplicado pelo número de garrafas PET inseridas.

Tabela 6 - Economia de concreto e a redução de peso

Viga	Nº garrafas PET 600 ml	Volume após inserção das garrafas PET (m ³)	Economia de concreto (*) (m ³)	Peso (Kg)	Redução de peso (*) (%)
VR	0,0	0,1056	0,0000	264,0	0,0
V1	9,0	0,1002	0,0054	250,5	5,1
V2	18,0	0,0948	0,0108	237,0	10,2
V3	27,0	0,0894	0,0162	223,5	15,3

(*) Em relação a viga VR



Figura 31 - Forma das Vigas



Figura 32 - Vigas Concretadas

3.2.3 - Alguns cuidados no processo de montagem.

- Como as garrafas PET eram mais leves que concreto, a última linha dessas garrafas foi amarrada com arame recozido nos estribos com objetivo de não emergirem no momento da concretagem;
- Os cabos dos extensômetros foram amarrados para cima com objetivo de não danificarem no momento da concretagem;
- Foi aplicado desmoldante nas paredes internas e fundos das formas das vigas para facilitar a desforma.
- A desforma ocorreu após 35 dias da concretagem das vigas.

3.3 - Instrumentação

3.3.1- Deslocamentos verticais

Em todas as vigas, os deslocamentos verticais foram medidos na face inferior no meio do vão da viga, ponto de maior flecha. Para tal, foi utilizado deflectômetro digital da marca DIGIMESS com precisão de 0,01 mm. O deflectômetro foi fixado em um sistema de suporte independente para evitar interferências nas leituras devido às movimentações no sistema de ensaio, ao se aproximar da carga de ruptura, o mesmo foi removido por segurança.

3.3.2 - Deformação nas armaduras e no concreto

As deformações da armadura de flexão e do concreto foram medidas com extensômetros elétricos de resistência (EER), fabricados pela EXCEL Sensores Ind. Com. Exp. Ltda. Para a deformação no concreto, em cada viga, foi utilizado um extensômetro modelo PA-06-201BA-120L, F.S, sendo fixado na face superior da viga. Quanto às deformações da armadura de flexão e no estribo, utilizou-se extensômetros modelo PA-06-

125AA-120L, F.S, posicionado na barra longitudinal central de cada viga no meio do comprimento da barra e no estribo mais próximo do apoio. Os extensômetros foram fixados lateralmente na barra, com o objetivo de evitar efeitos provenientes da flexão local das mesmas. A disposição dos EER na armadura de flexão e no concreto foi constante para todas as vigas, possibilitando uma análise comparativa dos resultados. A Figura 33 mostra o posicionamento dos extensômetros na armadura de flexão, na armadura de cisalhamento e na superfície do concreto.

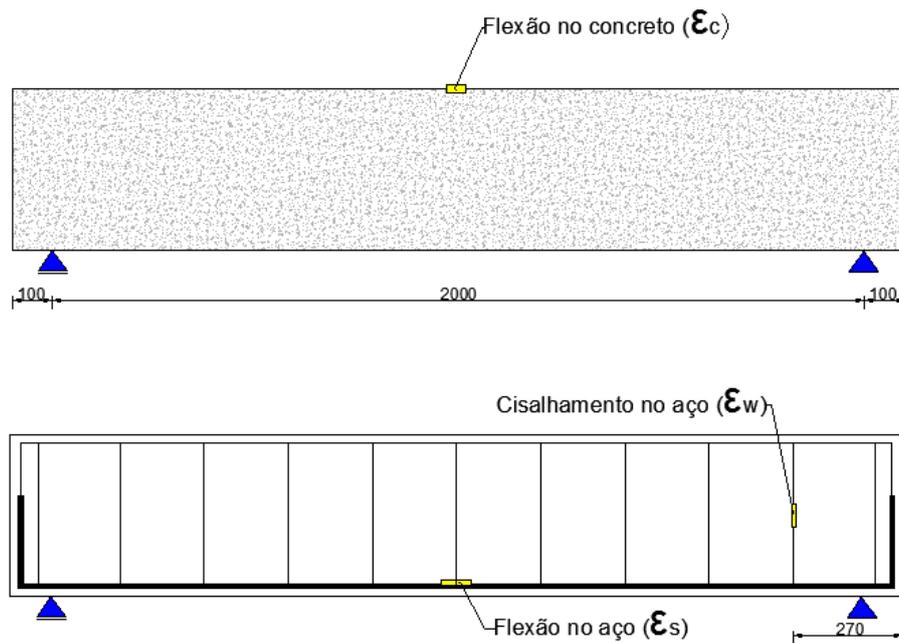


Figura 33 - Posição dos extensômetros nas vigas.

3.4 - Sistema de ensaio

O sistema de ensaio foi composto por um pórtico metálico fixado à laje de reação do laboratório, como suporte para aplicação de carga; 2 blocos de concreto, onde foram posicionados 2 aparelhos de simulação de apoio, sendo um de 1º gênero e outro de 2º gênero; um cilindro hidráulico com capacidade de carga de 1000 kN, para aplicação do carregamento nas vigas; uma célula de carga com capacidade de 1000 kN e precisão de 1 kN. No ensaio de Stuttgart o carregamento era aplicado sobre uma viga de reação que distribuía a carga em dois roletes afastados 750 mm dos apoios. O carregamento foi aplicado na direção vertical, no sentido de cima para baixo com incrementos de carga de 5 kN. A leitura dos extensômetros durante os ensaios era feita por meio do sistema de aquisição de dados ALMEMO. A Figura 34 mostra a vista 3D e a Figura 35 mostra a representação esquemática do sistema de ensaio

STTUTGART. O ponto de aplicação das forças, atendeu a relação $a/d \geq 2$ (sendo $a = 750 \text{ mm}$ e $d = 373,75 \text{ mm}$). Todas as vigas foram posicionadas como mostra as Figuras de 36 a 39 com as vigas VR, V1, V2 e V3 no sistema de ensaio.

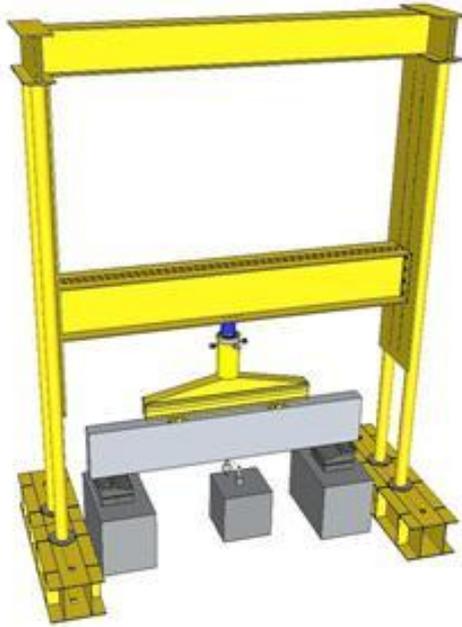


Figura 34 - Vista 3D do modelo de ensaio de Stuttgart

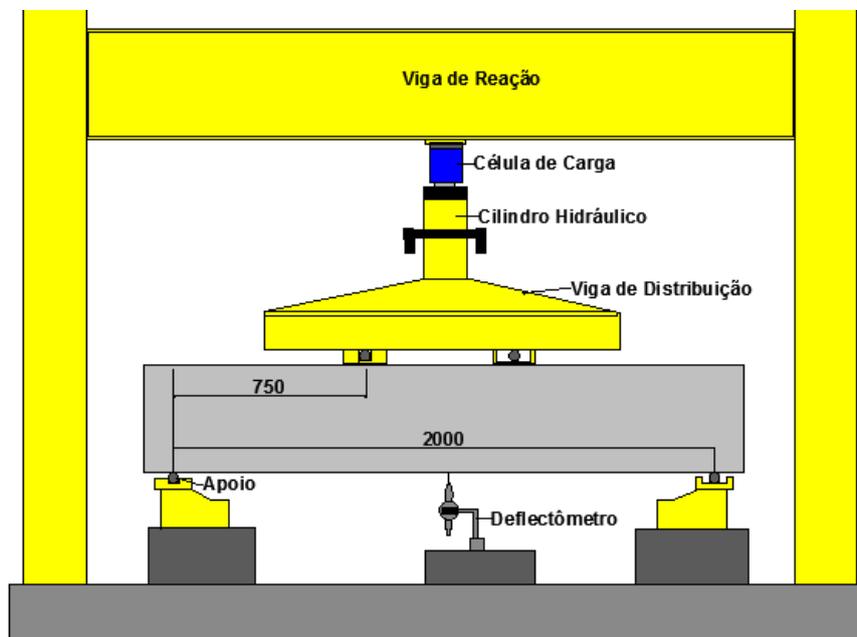


Figura 35 - Esquema do modelo de ensaio de Stuttgart



Figura 36 - Viga VR no sistema de ensaio



Figura 37 - Viga V1 no sistema de ensaio



Figura 38 - Viga V2 no sistema de ensaio



Figura 39 - Viga V3 no sistema de ensaio

CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 - Propriedades dos Materiais

O concreto utilizado no experimento foi fornecido por uma empresa que atua no mercado de venda de concreto usinado na cidade de Belém/PA. Foram ensaiados 3 corpos de prova cilíndricos de dimensões (100 x 200) mm² moldados de acordo com as recomendações da NBR 5738 (2003) e ensaiados segundo a NBR 5739 (2007): 03 (três) foram ensaiados para verificação da resistência a compressão simples (Figura 40). A Figura 41 mostra um corpo de rompido. A Tabela 7 apresenta os resultados dos ensaios de resistência a compressão simples. As barras de aço foram caracterizadas seguindo as recomendações da NBR 6152 (1992) utilizando 3 amostras de mesmo lote das barras tanto de 12,5 mm² como de 5,0 mm². As características das barras ensaiadas são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 7 - Resultado dos ensaios dos corpos-de-prova.

CP	f_c (MPa)
1	49,9
2	43,7
3	41,1

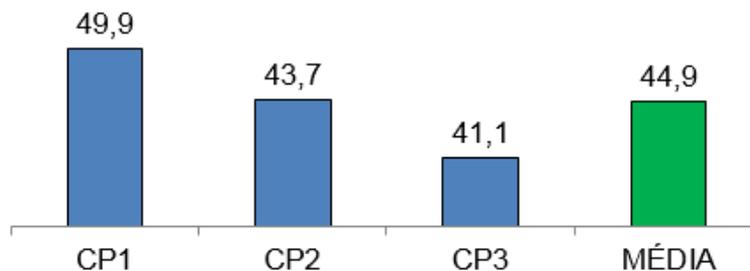


Figura 40 - Resistência a compressão simples (MPa)



Figura 41 - Corpos de prova ensaiados

Tabela 8 - Características das barras de aço.

\varnothing (mm)	f_{ys} (MPa)	ϵ_{ys} (‰)	E_s (GPa)
5,0	583,0	4,5	233,2
12,5	560,0	2,3	243,5

4.2 - Vigas pós-ensaio / Mapas de fissuração

Durante os ensaios foi realizada a leitura das fissuras de cada viga. As Figuras de 42 a 45 mostram as vigas após o ensaio com seus respectivos mapas de fissuração. Nota-se que na viga VR foi anotada uma carga máxima de 150 kN, na viga V1 foi anotado até 130 kN, na viga V2 foi anotado até 110 kN e na viga V3 foi anotado até 95 kN. Estas não foram as cargas máximas suportadas pelas referidas vigas. A leitura das fissuras foi interrompida para garantir a segurança do colaborador que estava realizando as leituras. Os mapas indicam um mesmo padrão de fissuração, fator importante para a comparação entre a viga maciça e as vigas vazadas.

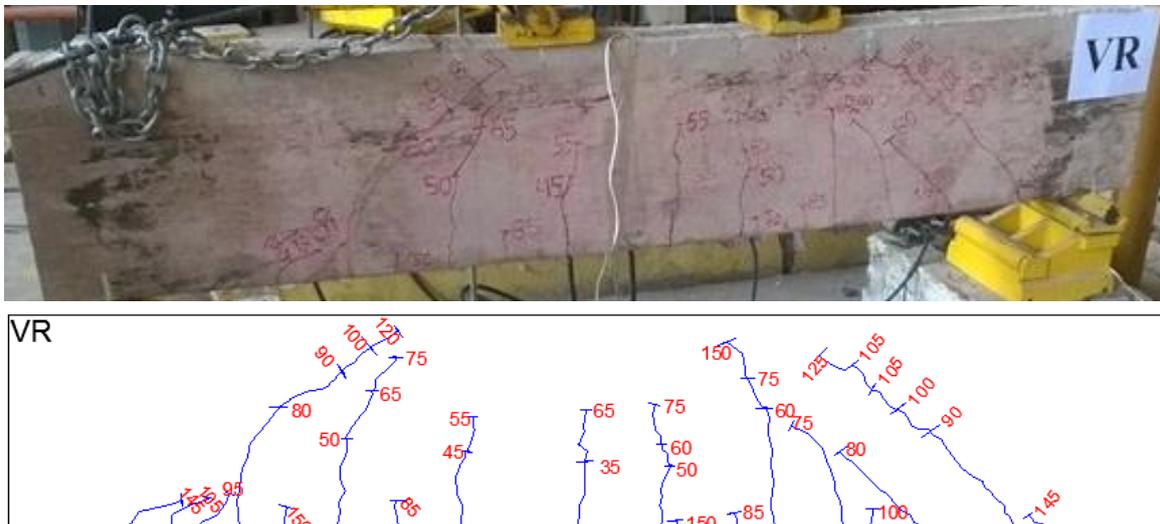
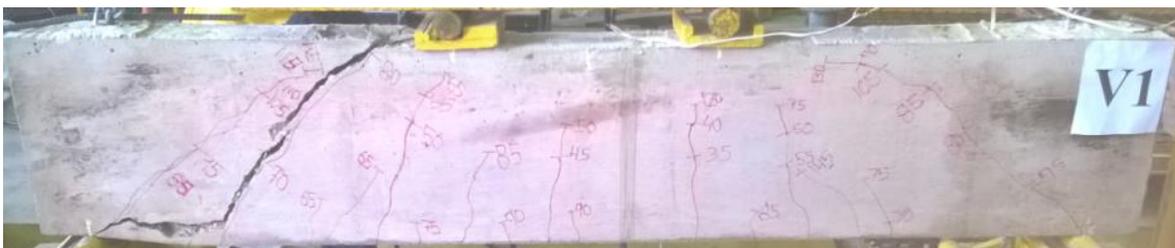


Figura 42 - Viga VR pós-ensaio / Mapa de fissuração



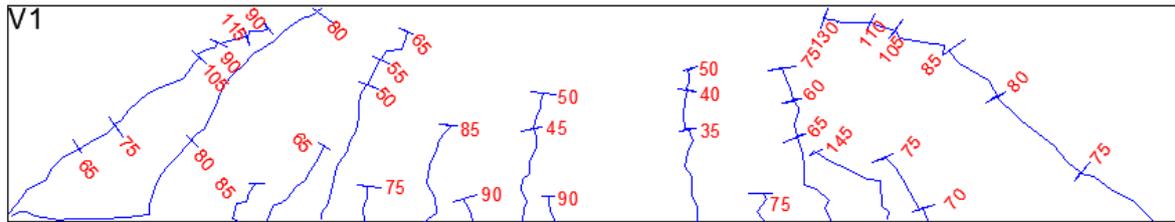


Figura 43 - Viga V1 pós-ensaio / Mapa de fissuração

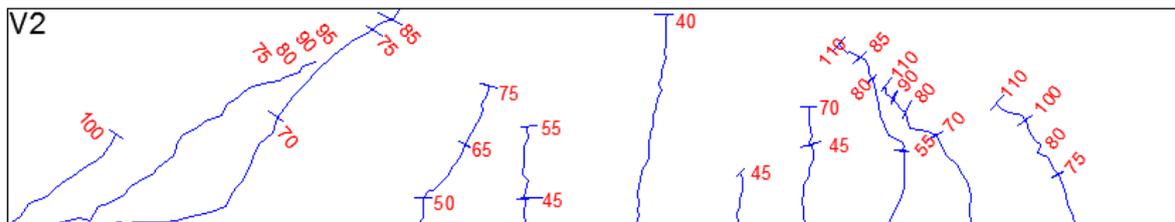


Figura 44 - Viga V2 pós-ensaio / Mapa de fissuração

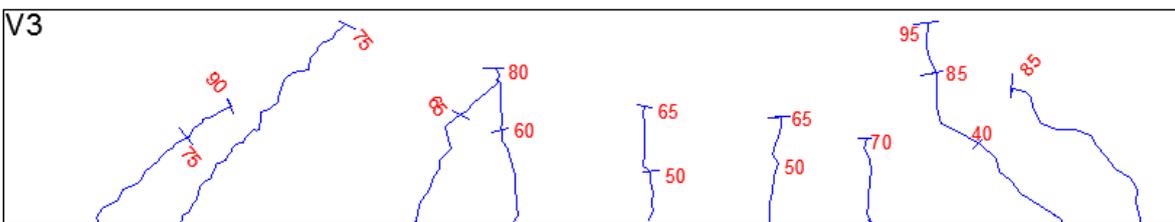


Figura 45 - Viga V3 pós-ensaio / Mapa de fissuração

4.3 - Deslocamentos verticais – Leitura no Deflectômetro

A leitura dos deslocamentos foi feita pelo deflectômetro durante pequenos intervalos entre os passos de carga. O deflectômetro foi removido do sistema de ensaio próximo à ruptura das vigas, a fim de evitar danos ao equipamento devido impactos na ruptura das peças. Na Figura 46 são mostrados graficamente os deslocamentos verticais das vigas. Os gráficos

mostram que as vigas vazadas tiveram comportamento semelhante às vigas maciças no que diz respeito aos deslocamentos.

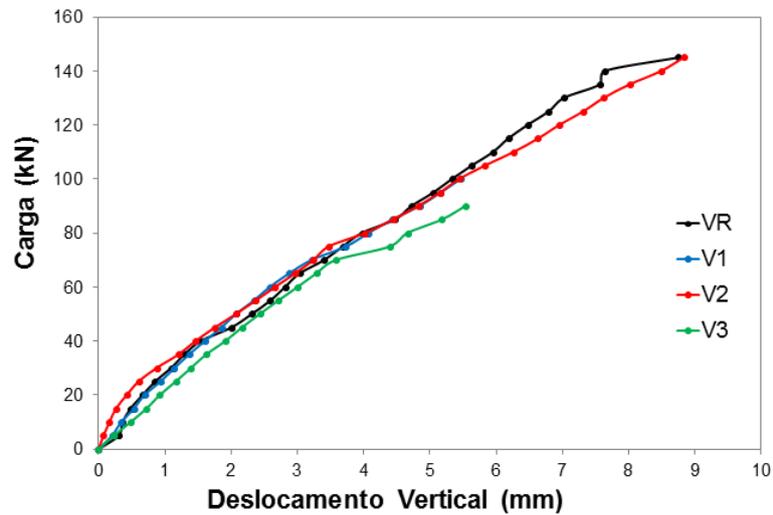


Figura 46 – Deslocamentos verticais nas vigas.

4.4 - Deformações na superfície do concreto – Leitura no Extensômetro

A medida das deformações na superfície do concreto foi obtida por meio de um extensômetro elétrico posicionado na parte superior das vigas, no centro do vão entre os apoios. Os resultados encontrados para as deformações na superfície do concreto registrado pelo extensômetro, em cada uma das vigas ensaiadas, são mostradas na Figura 47. A viga VR foi a que apresentou maior deformação, sendo que a viga V3 apresentou menor deformação, e as vigas V1 e V2 apresentaram deformações semelhantes.

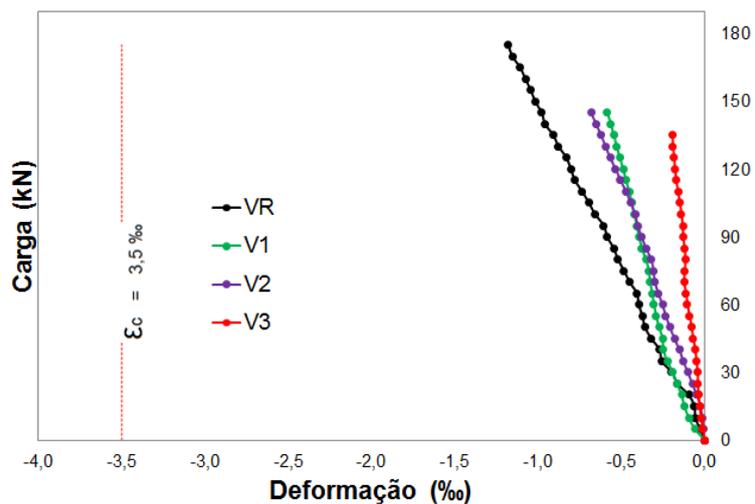


Figura 47 - Deformações na superfície do concreto.

4.5 - Deformações na armadura de flexão - Leitura no Extensômetro

A armadura de flexão foi monitorada no meio do comprimento da barra central. Os gráficos que representam as deformações das armaduras de flexão são mostrados na Figura 48. As vigas VR e V1 apresentaram escoamento da armadura de flexão na ruptura. A viga V2 apresentou menor deformação, tal fato foi constatado durante o ensaio, porém foi verificado que o extensômetro estava funcionando perfeitamente, portanto este comportamento deve ser estudado em trabalhos futuros.

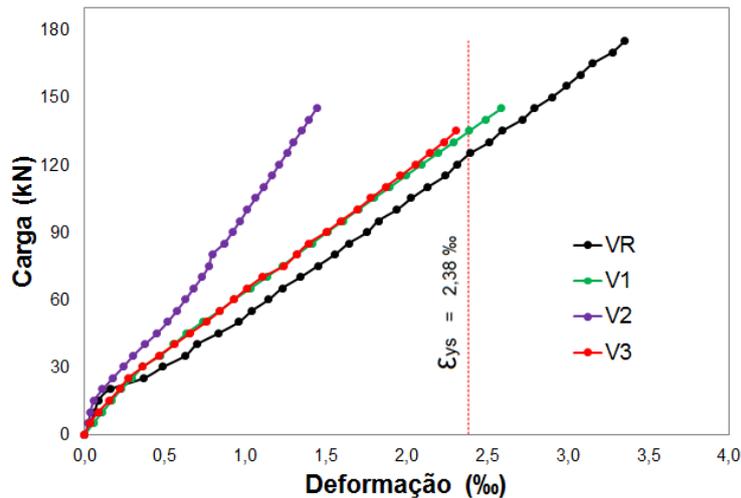


Figura 48 - Deformações na armadura de flexão

4.6 - Deformações na armadura de cisalhamento - Leitura no Extensômetro

A armadura de cisalhamento foi monitorada no estribo localizado a 270 mm do apoio. O gráfico que representa as deformações das armaduras de flexão é mostrado na Figura 49. Nas vigas VR e V1 não houve leitura das deformações, pois apesar da verificação do perfeito funcionamento dos extensômetros, o caminho da fissura seguiu outra trajetória impossibilitando a leitura. As deformações nos estribos das vigas V2 e V3 foram mais intensos, porque diminuiu a contribuição de concreto para combater os esforços de cisalhamento. Nota-se que a viga V3 que continha pouca contribuição de concreto no combate ao cisalhamento, sofreu uma deformação brusca quando da aplicação de carga de 750 kN.

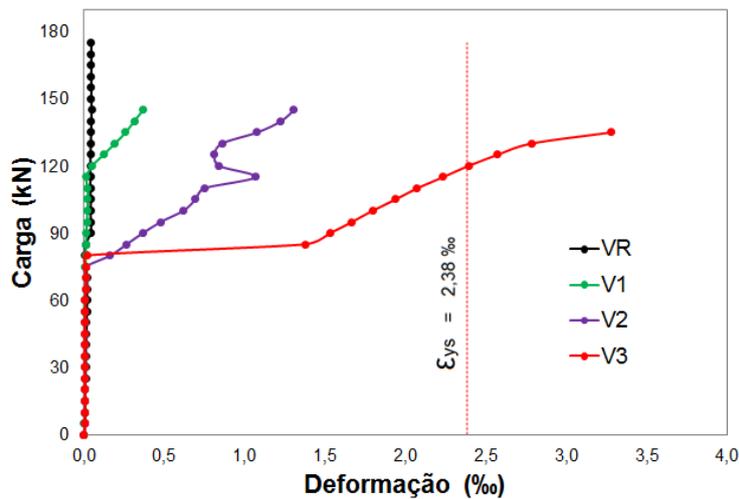


Figura 49 - Deformações na armadura de cisalhamento

4.7 - Comparação dos resultados dos cálculos (NBR) x resultados dos ensaios

Para comparação dos resultados dos ensaios com os resultados calculados de acordo com a norma 6118:2014, foram utilizados os resultados encontrados no modelo de cálculo I com $f_{c,m} = 44,9$ MPa, pois foram os menores encontrados entre os modelos de cálculo. De acordo com a Tabela 9, verificou-se que a relação V_u/V_{NBR} ficou muito próximo de 1 (um) com uma diferença para mais ou para menos no intervalo de 4% a 10%. Estes resultados comprovam que os ensaios foram executados conforme a norma estabelece.

Tabela 9 – Comparação: resultados de cálculos (NBR) x resultados ensaios.

Viga	Modelo de Cálculo I $\alpha = 90^\circ$	Resultados Ensaio V_u (kN)	Perda de Resistência Vigas Ensaaiadas (%)	Modo de Ruptura	V_u/V_{NBR}
VR	169,0	186,0	0,0	Flexão	1,10
V1	160,2	166,0	10,8	Cisalhamento	1,04
V2	151,5	146,0	21,5	Cisalhamento	0,96
V3	142,7	137,0	26,3	Cisalhamento	0,96

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 - Conclusões

Neste trabalho foram apresentados resultados experimentais de 4 vigas de concreto armado sendo 3 delas de seção vazada. Foi observado que a redução da área de concreto da seção não influenciou significativamente no comportamento das vigas quanto aos deslocamentos verticais. Por outro lado, a comparação das cargas de ruptura evidencia que as vigas vazadas apresentam menor resistência ao esforço cortante que as vigas maciças. É importante ressaltar que as perdas de resistência variaram muito entre os elementos, sendo que entre viga VR e a viga V3 houve uma diferença de aproximadamente 26,3%. Houve uma economia de concreto e redução de peso entre as vigas VR e a viga V3 de aproximadamente 15,3%. Verificou-se também na tabela 8 que os resultados obtidos conforme Modelo de Cálculo I, foram muito próximos aos obtidos nos ensaios. O sistema estrutural de vigas vazadas com o uso de garrafas PET se mostra uma solução construtiva válida, sendo necessário o desenvolvimento de mais estudos a fim de melhorar o entendimento de seu comportamento e aprimorar a técnica.

5.2 - Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, poderia ser realizado ensaios de torção nas vigas com as mesmas características das apresentadas neste estudo.

Outro trabalho também importante poderia ser a realização dos mesmos ensaios deste experimento em vigas dimensionadas para ruptura por flexão, fragilizando a armadura da flexão e aumentando a armadura para combater o cisalhamento, com objetivo de estudar o comportamento destas vigas.

A comparação dos resultados da NBR 6118:2014 com normas internacionais poderia ser outro trabalho a ser estudado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13230: Embalagens e Acondicionamentos plásticos recicláveis – Identificação e simbologia. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos-de-prova. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6152: Materiais metálicos - Determinação das propriedades mecânicas à tração. Rio de Janeiro, ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto: Procedimentos, Rio de Janeiro, 2004.

CANELLAS, S. S., Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassas / Susan Sales Canellas;– Dissertação (mestrado) Rio de Janeiro: PUC - Rio. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2005.

CEMPRE – Reciclagem: Ontem, Hoje, Sempre , Compromisso Empresarial Para a Reciclagem. Caderno de Reciclagem N° 2, Disponível em: < www.cempre.org.br > 2009.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO n. 307, de 05 de julho de 2002. Brasília, 2002.

INOUE, S., EGAWA, N. Flexural and Shear Behavior of Reinforced Concrete Hollow Beams Under Reversed Cyclic Loads. Elsevier Science Ltd, Paper No. 1359. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, 1996.

CHIAD, S. S. Shear Stresses of Hollow Concrete Beams. Journal of Applied Sciences Research, v. 9, n. 4, p. 2880-2889, 2013.

PIVA, A. M., WIEBECK, H. Reciclagem do plástico/ Ana Magda Piva, Helio Wiebeck.- São Paulo: Artliber editora, 2004.

ABIPET. Associação Brasileira da Indústria do PET. 9º Censo da Reciclagem de PET no Brasil. Brasília, 2015. 25p.

GALLI, B., MAGINA, C., MENEZES, R., PEREZ, P., UENO, H. 1º SNCS – Seminário Nacional de Construções Sustentáveis em Passo Fundo/RS, 2014.

GOMES A. C., Construção de Casas Utilizando Garrafas PET, Rio Grande do Norte. Projeto de construção de casas com garrafa PET. 2014.

HUANG E. A., Construção do Edifício Eco Ark. Construtora Sustentável Miniwiz Sustainable Energy Developments Ltd. Taiwan. 2012.

MOREIRA, P. Construção do Edifício Garagem do Terminal 2 do aeroporto Rio-Galeão. Rio de Janeiro. 2014.

MANO, E. B., PACHECO, E. B. A. V., BONELLI, C. M. C., Meio ambiente, poluição e reciclagem/ Eloísa Biasotto Mano, Elem Beatriz Acordi Vasques Pacheco, Claudia Maria Chagas Bonelli, 1º ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

CHAER, A. V.; OLIVEIRA, M. G. D. Notas de Aula da disciplina Estruturas de Concreto Armado I. Curso Engenharia Civil. Departamento de Engenharia. Universidade Católica de Goiás. Conteúdo disponibilizado para fotocópias, com autorização do autor. Goiânia-GO, 2001.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. Construções de Concreto, Rio de Janeiro, v. 1, 2 e 3, 1982.

MÖRSCH, E. Der Eisenbetonbau - Seine Anwendung und Theorie, 1st ed. Wayss and Freytag, A. G., Im Selbstverlag der Firma, Neustadt a. d. Haardt, Germany, 1902.

MÖRSCH, E. Der Eisenbetonbau - Seine Theorie und Anwendung (Reinforced concrete construction) – Theory and application), 5th ed. Wittwer, Stuttgart, v.1, Part 2, 1922.

MONIER, J. O inventor do concreto armado – Notas de Aula - Prof. Eduardo C. S. Thomaz – Instituto Militar de Engenharia – Exército Brasileiro – 1994.

MacGREGOR, J. G., WIGHT, J. K. - Reinforced Concrete : Mechanics and Design – 6th ed. – 2009.

RODRIGUES, H.; CUNHA, L.; OLIVEIRA, D. Análise Experimental de Vigas Vazadas de Concreto Armado. Artigo apresentado no IBRACON. 2014.

ANEXO A1 - Planilha de cálculo de acordo com a NBR 6118:2014 – Viga VR

VR	ESTRIBO	MODELO DE CÁLCULO I - $\theta = 45^\circ$	MODELO DE CÁLCULO II - $\theta = 30^\circ$	MODELO DE CÁLCULO II - $\theta = 45^\circ$																								
$B_w = 120,0 \text{ mm}$ $H = 400,0 \text{ mm}$ $a = 750,0 \text{ mm}$ $L = 2000,0 \text{ mm}$	$\phi = 5,00 \text{ mm}$ $A_{SWA} = 19,63 \text{ mm}^2$ $S_A = 200,00 \text{ mm}$ $F_{YWKAKO} = 583,00 \text{ MPa}$	$V_{RK2,I} = 0,27 * (1 - F_{CK}/250) * F_{CD} * A_C$ $V_{RK2,I} = 318,62 \text{ kN}$ $V_{SK} / V_{RK2,I} = 61,01\% < 100,0\% \text{ OK}$	$V_{RK2,II} = 0,54 * (1 - F_{CK}/250) * F_{CK} * B_w * d * (\text{SEN } \theta)^2 * (\text{COT } \theta + \text{COT } \alpha)$ $V_{RK2,II} = 386,30 \text{ kN}$ $V_{SK} / V_{RK2,II} = 50,32\% < 100,0\% \text{ OK}$	$V_{RK2,III} = 0,54 * (1 - F_{CK}/250) * F_{CK} * B_w * d * (\text{SEN } \theta)^2 * (\text{COT } \theta + \text{COT } \alpha)$ $V_{RK2,III} = 446,07 \text{ kN}$ $V_{SK} / V_{RK2,III} = 43,58\% < 100,0\% \text{ OK}$																								
$F_{CK} = 44,9 \text{ MPa}$	$\alpha = 90^\circ$ $\text{SEN} = 1,00$ $\text{COS} = 0,00$	$V_{SWA,I} = (A_{SWA} / S_A) * 0,9 * d * F_{YWD} * (\text{SEN } \alpha + \text{COS } \alpha)$ $V_{SWA,I} = 33,48 \text{ kN}$ $V_{CD} = 0,09 * F_{CK} * (L/3) * A_C$ $V_{CD} = 50,99 \text{ kN}$	$V_{SWA,II} = (A_{SWA} / S_A) * 0,9 * d * F_{YWK,A} * (\text{COT } \theta + \text{COT } \alpha) * \text{SEN } \alpha$ $V_{SWA,II} = 66,69 \text{ kN}$ $V_{C1} = V_{CD}$, SE $V_{SK} \leq V_{CD}$; $V_{C1} = 0$, SE $V_{SK} > V_{CD}$; INTERPOLAÇÃO LINEAR $V_{C1} = 45,90 \text{ kN}$	$V_{SWA,III} = (A_{SWA} / S_A) * 0,9 * d * F_{YWK,A} * (\text{COT } \theta + \text{COT } \alpha) * \text{SEN } \alpha$ $V_{SWA,III} = 38,51 \text{ kN}$ $V_{C1} = V_{CD}$, SE $V_{SK} \leq V_{CD}$; $V_{C1} = 0$, SE $V_{SK} > V_{CD}$; INTERPOLAÇÃO LINEAR $V_{C1} = 45,90 \text{ kN}$																								
$F_s = 560,0 \text{ MPa}$	$\theta = 30^\circ$ $\text{SEN} = 0,50$ $\text{COS} = 0,87$	$V_{RKMAX} = V_{SW} + V_{CD}$ $V_{RKMAX} = 84,48 \text{ kN}$ $2 * V_{RKMAX} = 168,95 \text{ kN}$	$V_{RKMAX} = V_{SW} + V_{CD} = (V_{SWA,II} + V_{SW,P1}) + V_{CD}$ $V_{RKMAX} = 112,59 \text{ kN}$ $2 * V_{RKMAX} = 225,19 \text{ kN}$	$V_{RKMAX} = V_{SW} + V_{CD} = (V_{SWA,III} + V_{SW,P1}) + V_{CD}$ $V_{RKMAX} = 118,17 \text{ kN}$ $2 * V_{RKMAX} = 236,34 \text{ kN}$																								
$3 \phi \frac{1}{2}$ $12,5 \text{ mm}$ $A_s = 368,1 \text{ mm}^2$ $C = 20,0 \text{ mm}$	$\theta = 45^\circ$ $\text{SEN} = 0,71$ $\text{COS} = 0,71$	$P_{FLEX} / (2 * V_{RKMAX}) = 115,06\%$	$P_{FLEX} / (2 * V_{RKMAX}) = 86,33\%$	$P_{FLEX} / (2 * V_{RKMAX}) = 82,26\%$																								
$d = H - (\phi_{BARRA} / 2 + C + \phi_{EST})$ $d = 373,8 \text{ mm}$	GARRAFA PET $D_{RET} = 70,00 \text{ mm}$ $A_{RET} = 3848,45 \text{ mm}^2$ $V_{RET} = 600,00 \text{ ml}$	$M_s = MR_{CK}$ $(P/2) * a = MR_{KC}$ $P_{FLEX} = 194,40 \text{ kN}$ $P_{FLEX} = 19,44 \text{ Tf}$	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>V_C</th> <th>V_{SK}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$VC1 ==>$</td> <td>0,00 kN</td> <td>386,30 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td>45,90 kN</td> <td>84,48 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td>50,99 kN</td> <td>50,99 kN</td> </tr> </tbody> </table>		V_C	V_{SK}	$VC1 ==>$	0,00 kN	386,30 kN		45,90 kN	84,48 kN		50,99 kN	50,99 kN	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>V_C</th> <th>V_{SK}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$VC1 ==>$</td> <td>0,00 kN</td> <td>386,30 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td>45,90 kN</td> <td>84,48 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td>50,99 kN</td> <td>50,99 kN</td> </tr> </tbody> </table>		V_C	V_{SK}	$VC1 ==>$	0,00 kN	386,30 kN		45,90 kN	84,48 kN		50,99 kN	50,99 kN
	V_C	V_{SK}																										
$VC1 ==>$	0,00 kN	386,30 kN																										
	45,90 kN	84,48 kN																										
	50,99 kN	50,99 kN																										
	V_C	V_{SK}																										
$VC1 ==>$	0,00 kN	386,30 kN																										
	45,90 kN	84,48 kN																										
	50,99 kN	50,99 kN																										
$RC = RS$ $0,95 * F_{CK} * B_w * 0,8 * x = A_s * F_s$ $x = 50,3 \text{ mm}$	ÁREA DE CONCRETO SEGMENTOS DE PET 0 $\text{ÁREA}_{VAZADA} = 0,00 \text{ mm}^2$ $\text{ÁREA}_{MADRA} = 44850,00 \text{ mm}^2$ $\text{ÁREA}_{CONCRETO} = 44850,00 \text{ mm}^2$																											
$MR_{KC} = A_s * F_s * (d - 0,4 * x)$ $MR_{KC} = 72,9 \text{ kN} \cdot \text{m}$	$M_s = MR_{CK}$ $(P/2) * a = MR_{KC}$ $P_{FLEX} = 194,40 \text{ kN}$ $P_{FLEX} = 19,44 \text{ Tf}$																											

ANEXO A2 - Planilha de cálculo de acordo com a NBR 6118:2014 – Viga V1

V1	MODELO DE CÁLCULO I - $\theta = 45^\circ$	MODELO DE CÁLCULO II - $\theta = 30^\circ$	MODELO DE CÁLCULO II - $\theta = 45^\circ$												
$B_w = 120,0 \text{ mm}$ $H = 400,0 \text{ mm}$ $a = 750,0 \text{ mm}$ $L = 2000,0 \text{ mm}$	ESTRIBO $\phi = 5,00 \text{ mm}$ $A_{SWA} = 19,63 \text{ mm}^2$ $S_A = 200,00 \text{ mm}$ $F_{YWKAO} = 583,00 \text{ MPa}$	$V_{RK2,I} = 0,27 * (1 - F_{CK}/250) * F_{CD} * A_C$ $V_{RK2,I} = 291,28 \text{ kN}$ $V_{SK} / V_{RK2,I} = 66,74\% < 100,0\% \text{ OK}$	$V_{RK2,II} = 0,54 * (1 - F_{CK}/250) * F_{CK} * B_w * d * (\text{SEN } \theta)^2 * (\text{COT } \theta + \text{COT } \alpha)$ $V_{RK2,II} = 386,30 \text{ kN}$ $V_{SK} / V_{RK2,II} = 50,32\% < 100,0\% \text{ OK}$												
$F_{CK} = 44,9 \text{ MPa}$	$\alpha = 90^\circ$ $\text{SEN.} = 1,00$ $\text{COS} = 0,00$	$V_{SWA,I} = (A_{SWA} / S_A) * 0,9 * d * F_{YWD} * (\text{SEN } \alpha + \text{COS } \alpha)$ $V_{SWA,I} = 33,48 \text{ kN}$ $V_{CD} = 0,09 * F_{CK} * (2/3) * A_C$ $V_{CD} = 46,62 \text{ kN}$	$V_{SWA,II} = (A_{SWA} / S_A) * 0,9 * d * F_{YWKA} * (\text{COT } \theta + \text{COT } \alpha) * \text{SEN } \alpha$ $V_{SWA,II} = 66,69 \text{ kN}$ $V_{C1} = V_{CD}$, SE $V_{SK} \leq V_{CD}$; $V_{C1} = 0$, SE $V_{SK} > V_{CD}$; INTERPOLAÇÃO LINEAR $V_{C1} = 42,02 \text{ kN}$												
$F_s = 560,0 \text{ MPa}$	$\theta = 30^\circ$ $\text{SEN.} = 0,50$ $\text{COS} = 0,87$	$V_{RKMAX} = V_{SW} + V_{CD}$ $V_{RKMAX} = 80,10 \text{ kN}$ $2 * V_{RKMAX} = 160,20 \text{ kN}$	$V_{RKMAX} = V_{SW} + V_{CD} = (V_{SWA,I} + V_{SWPI}) + V_{CD}$ $V_{RKMAX} = 108,71 \text{ kN}$ $2 * V_{RKMAX} = 217,43 \text{ kN}$												
$3 \phi 1/2"$ $12,5 \text{ mm}$ $A_s = 368,1 \text{ mm}^2$ $C = 20,0 \text{ mm}$	$\theta = 45^\circ$ $\text{SEN.} = 0,71$ $\text{COS} = 0,71$	$P_{FLEX} / (2 * V_{RKMAX}) = 121,35\%$	$P_{FLEX} / (2 * V_{RKMAX}) = 89,41\%$												
$d = H - (\phi_{BARRA} / 2 + C + \phi_{EST})$ $d = 373,8 \text{ mm}$	GARRAFA PET $D_{PET} = 70,00 \text{ mm}$ $A_{PET} = 3848,45 \text{ mm}^2$ $V_{PET} = 600,00 \text{ ml}$	$M_s = MR_{CK}$ $(P/2) * a = MR_{RC}$ $P_{FLEX} = 194,40 \text{ kN}$ $P_{FLEX} = 19,44 \text{ Tf}$	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td>V_C</td> <td>V_{SK}</td> </tr> <tr> <td>$VC1 \implies$</td> <td>0,00 kN</td> <td>386,30 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td>42,02 kN</td> <td>80,10 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td>46,62 kN</td> <td>46,62 kN</td> </tr> </table>		V_C	V_{SK}	$VC1 \implies$	0,00 kN	386,30 kN		42,02 kN	80,10 kN		46,62 kN	46,62 kN
	V_C	V_{SK}													
$VC1 \implies$	0,00 kN	386,30 kN													
	42,02 kN	80,10 kN													
	46,62 kN	46,62 kN													
$RC = RS$ $0,95 * F_{CK} * B_w * 0,8 * x = A_s * F_s$ $x = 50,3 \text{ mm}$	ÁREA DE CONCRETO SEGMENTOS DE PET 1 $\text{ÁREA}_{VAZADA} = 3848,45 \text{ mm}^2$ $\text{ÁREA}_{MADICA} = 44850,00 \text{ mm}^2$ $\text{ÁREA}_{CONCRETO} = 41001,55 \text{ mm}^2$	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td>V_C</td> <td>V_{SK}</td> </tr> <tr> <td>$VC1 \implies$</td> <td>0,00 kN</td> <td>386,30 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td>42,02 kN</td> <td>80,10 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td>46,62 kN</td> <td>46,62 kN</td> </tr> </table>		V_C	V_{SK}	$VC1 \implies$	0,00 kN	386,30 kN		42,02 kN	80,10 kN		46,62 kN	46,62 kN	
	V_C	V_{SK}													
$VC1 \implies$	0,00 kN	386,30 kN													
	42,02 kN	80,10 kN													
	46,62 kN	46,62 kN													
$MR_{RC} = A_s * F_s * (d - 0,4 * x)$ $MR_{RC} = 72,9 \text{ kN} \cdot \text{m}$	$M_s = MR_{CK}$ $(P/2) * a = MR_{RC}$ $P_{FLEX} = 194,40 \text{ kN}$ $P_{FLEX} = 19,44 \text{ Tf}$														

ANEXO A3 - Planilha de cálculo de acordo com a NBR 6118:2014 – Viga V2

V2	MODELO DE CÁLCULO I - $\theta = 45^\circ$	MODELO DE CÁLCULO II - $\theta = 30^\circ$	MODELO DE CÁLCULO II - $\theta = 45^\circ$																									
<p>B_w = 120,0 mm H = 400,0 mm a = 750,0 mm L = 2000,0 mm</p>	<p>ESTRIBO</p> <p>ϕ = 5,00 mm A_{SWA} = 19,63 mm² S_A = 200,00 mm F_{YWKACD} = 583,00 MPa</p>	<p>V_{RRQ2,I} = 0,27 * (1 - F_{cd}/250) * F_{cd} * A_c V_{RRQ2,I} = 263,94 kN V_{SK} / V_{RRQ2,I} = 73,65% <100,0% OK</p>	<p>V_{RRQ2,II} = 0,54 * (1 - F_{cd}/250) * F_{cd} * B_w * d * (SEN θ)² * (COT θ + COT α) V_{RRQ2,II} = 386,30 kN V_{SK} / V_{RRQ2,II} = 50,32% <100,0% OK</p>	<p>V_{RRQ2,III} = 0,54 * (1 - F_{cd}/250) * F_{cd} * B_w * d * (SEN θ)² * (COT θ + COT α) V_{RRQ2,III} = 446,07 kN V_{SK} / V_{RRQ2,III} = 43,58% <100,0% OK</p>																								
<p>F_{cd} = 44,9 MPa</p>	<p>α = 90 ° SEN = 1,00 COS = 0,00</p>	<p>V_{SWA,I} = (A_{SWA} / S_A) * 0,9 * d * F_{YWD} * (SEN α + COS α) V_{SWA,I} = 33,48 kN V_{CD} = 0,09 * F_{cd} * (2/3) * A_c V_{CD} = 42,24 kN</p>	<p>V_{SWA,II} = (A_{SWA} / S_A) * 0,9 * d * F_{YWKA} * (COT θ + COT α) * SEN α V_{SWA,II} = 66,69 kN V_{CD} = V_{CD}, SE V_{SK} ≤ V_{CD}; V_{CD} = 0, SE V_{SK} > V_{CD}; V_{CD} = 0, SE V_{SK} > V_{RRQ2}; INTERPOLAÇÃO LINEAR V_{CD} = 38,13 kN</p>	<p>V_{SWA,III} = (A_{SWA} / S_A) * 0,9 * d * F_{YWKA} * (COT θ + COT α) * SEN α V_{SWA,III} = 38,50 kN V_{CD} = V_{CD}, SE V_{SK} ≤ V_{CD}; V_{CD} = 0, SE V_{SK} > V_{CD}; V_{CD} = 0, SE V_{SK} > V_{RRQ2}; INTERPOLAÇÃO LINEAR V_{CD} = 38,13 kN</p>																								
<p>F_s = 560,0 MPa</p>	<p>θ = 30 ° SEN = 0,50 COS = 0,87</p>	<p>V_{RRQMAX} = V_{SW} + V_{CD} V_{RRQMAX} = 75,72 kN 2 * V_{RRQMAX} = 151,45 kN</p>	<p>V_{RRQMAX} = V_{SW} + V_{CD} = (V_{SWA,II} + V_{SW,PI}) + V_{CD} V_{RRQMAX} = 104,82 kN 2 * V_{RRQMAX} = 209,64 kN</p>	<p>V_{RRQMAX} = V_{SW} + V_{CD} = (V_{SWA,III} + V_{SW,PI}) + V_{CD} V_{RRQMAX} = 107,29 kN 2 * V_{RRQMAX} = 214,58 kN</p>																								
<p>3 ϕ 1/2" 12,5 mm A_s = 368,1 mm² C = 20,0 mm</p>	<p>θ = 45 ° SEN = 0,71 COS = 0,71</p>	<p>P_{FLEX} / (2 * V_{RRQMAX}) = 128,36%</p>	<p>P_{FLEX} / (2 * V_{RRQMAX}) = 92,73%</p>	<p>P_{FLEX} / (2 * V_{RRQMAX}) = 90,60%</p>																								
<p>d = H - (Ø_{BARRA} / 2 + C + Ø_{EST}) d = 373,8 mm</p>	<p>GARRAFA PET</p> <p>D_{PET} = 70,00 mm A_{PET} = 3848,45 mm² V_{PET} = 600,00 ml</p>	<p>M_s = MR_{cd} (P/2)*a = MR_{cd} P_{FLEX} = 194,40 kN P_{FLEX} = 19,44 Tf</p>	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>V_c</th> <th>V_{SK}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>VC1 ==></td> <td>0,00 kN</td> <td>386,30 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td>38,13 kN</td> <td>75,72 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td>42,24 kN</td> <td>42,24 kN</td> </tr> </tbody> </table>		V _c	V _{SK}	VC1 ==>	0,00 kN	386,30 kN		38,13 kN	75,72 kN		42,24 kN	42,24 kN	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>V_c</th> <th>V_{SK}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>VC1 ==></td> <td>0,00 kN</td> <td>386,30 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td>38,13 kN</td> <td>75,72 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td>42,24 kN</td> <td>42,24 kN</td> </tr> </tbody> </table>		V _c	V _{SK}	VC1 ==>	0,00 kN	386,30 kN		38,13 kN	75,72 kN		42,24 kN	42,24 kN
	V _c	V _{SK}																										
VC1 ==>	0,00 kN	386,30 kN																										
	38,13 kN	75,72 kN																										
	42,24 kN	42,24 kN																										
	V _c	V _{SK}																										
VC1 ==>	0,00 kN	386,30 kN																										
	38,13 kN	75,72 kN																										
	42,24 kN	42,24 kN																										
<p>RC = RS 0,95 * F_{cd} * B_w * 0,8 * x = A_s * F_s x = 50,3 mm</p>	<p style="text-align: center;">ÁREA DE CONCRETO</p> <p>SEGMENTOS DE PET 2 ÁREA_{VAZADA} = 7696,90 mm² ÁREA_{MINÚCIA} = 44850,00 mm² ÁREA_{CONCRETO} = 37153,10 mm²</p>																											
<p>MR_{cd} = A_s * F_{ys} * (d - 0,4 * x) MR_{cd} = 72,9 kN . m</p>	<p>M_s = MR_{cd} (P/2)*a = MR_{cd} P_{FLEX} = 194,40 kN P_{FLEX} = 19,44 Tf</p>																											

ANEXO A4 - Planilha de cálculo de acordo com a NBR 6118:2014 – Viga V3

V3	MODELO DE CÁLCULO I - $\theta = 45^\circ$	MODELO DE CÁLCULO II - $\theta = 30^\circ$	MODELO DE CÁLCULO II - $\theta = 45^\circ$												
$B_w = 120,0 \text{ mm}$ $H = 400,0 \text{ mm}$ $a = 750,0 \text{ mm}$ $L = 2000,0 \text{ mm}$	ESTRIBO $\phi = 5,00 \text{ mm}$ $A_{SWA} = 19,63 \text{ mm}^2$ $S_A = 200,00 \text{ mm}$ $F_{YWK-AQD} = 583,00 \text{ MPa}$														
$F_{ck} = 44,9 \text{ MPa}$	$V_{RK2,I} = 0,27 * (1 - F_{ck}/250) * F_{cd} * A_c$ $V_{RK2,I} = 236,60 \text{ kN}$ $V_{SK} / V_{RK2,I} = 82,17\% < 100,0\% \text{ OK}$														
$F_s = 560,0 \text{ MPa}$	$V_{RK2,II} = 0,54 * (1 - F_{ck}/250) * F_{ck} * B_w * d * (\text{SEN } \theta)^2 * (\text{COT } \theta + \text{COT } \alpha)$ $V_{RK2,II} = 386,30 \text{ kN}$ $V_{SK} / V_{RK2,II} = 50,32\% < 100,0\% \text{ OK}$														
	$V_{RK2,III} = 0,54 * (1 - F_{ck}/250) * F_{ck} * B_w * d * (\text{SEN } \theta)^2 * (\text{COT } \theta + \text{COT } \alpha)$ $V_{RK2,III} = 446,07 \text{ kN}$ $V_{SK} / V_{RK2,III} = 43,58\% < 100,0\% \text{ OK}$														
	$V_{SWA,I} = (A_{SWA} / S_A) * 0,9 * d * F_{YWD} * (\text{SEN } \alpha + \text{COS } \alpha)$ $V_{SWA,I} = 33,48 \text{ kN}$ $V_{CD} = 0,09 * F_{ck} * (2/3) * A_c$ $V_{CD} = 37,87 \text{ kN}$														
	$V_{SWA,II} = (A_{SWA} / S_A) * 0,9 * d * F_{YWKA} * (\text{COT } \theta + \text{COT } \alpha) * \text{SEN } \alpha$ $V_{SWA,II} = 66,69 \text{ kN}$ $V_{C1} = V_{CD}$, SE $V_{SK} \leq V_{CD}$; $V_{C1} = 0$, SE $V_{SK} > V_{CD}$; INTERPOLAÇÃO LINEAR $V_{C1} = 34,23 \text{ kN}$														
	$V_{SWA,III} = (A_{SWA} / S_A) * 0,9 * d * F_{YWKA} * (\text{COT } \theta + \text{COT } \alpha) * \text{SEN } \alpha$ $V_{SWA,III} = 38,50 \text{ kN}$ $V_{C1} = V_{CD}$, SE $V_{SK} \leq V_{CD}$; $V_{C1} = 0$, SE $V_{SK} > V_{CD}$; INTERPOLAÇÃO LINEAR $V_{C1} = 34,23 \text{ kN}$														
$3 \phi \quad 1/2''$ $12,5 \text{ mm}$ $A_s = 368,1 \text{ mm}^2$ $C = 20,0 \text{ mm}$	$\theta = 30^\circ$ $\text{SEN} = 0,50$ $\text{COS} = 0,87$														
	$V_{RKMAX} = V_{SW} + V_{CD}$ $V_{RKMAX} = 71,35 \text{ kN}$ $2 * V_{RKMAX} = 142,70 \text{ kN}$														
	$V_{RKMAX} = V_{SW} + V_{CD} = (V_{SWA,I} + V_{SWP,I}) + V_{CD}$ $V_{RKMAX} = 100,92 \text{ kN}$ $2 * V_{RKMAX} = 201,84 \text{ kN}$														
	$V_{RKMAX} = V_{SW} + V_{CD} = (V_{SWA,III} + V_{SWP,III}) + V_{CD}$ $V_{RKMAX} = 101,82 \text{ kN}$ $2 * V_{RKMAX} = 203,65 \text{ kN}$														
$d = H - (\phi_{BARRA} / 2 + C + \phi_{EST})$ $d = 373,8 \text{ mm}$	$\theta = 45^\circ$ $\text{SEN} = 0,71$ $\text{COS} = 0,71$														
	$P_{FLEX} / (2 * V_{RKMAX}) = 136,24\%$														
	$P_{FLEX} / (2 * V_{RKMAX}) = 96,32\%$														
	$P_{FLEX} / (2 * V_{RKMAX}) = 95,46\%$														
	$M_s = MR_{CK}$ $(P/2) * a = MR_{KC}$														
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th style="text-align: center;">V_C</th> <th style="text-align: center;">V_{SK}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$VC1 ==>$</td> <td style="text-align: center;">0,00 kN</td> <td style="text-align: center;">386,30 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">34,23 kN</td> <td style="text-align: center;">71,35 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">37,87 kN</td> <td style="text-align: center;">37,87 kN</td> </tr> </tbody> </table>				V_C	V_{SK}	$VC1 ==>$	0,00 kN	386,30 kN		34,23 kN	71,35 kN		37,87 kN	37,87 kN
	V_C	V_{SK}													
$VC1 ==>$	0,00 kN	386,30 kN													
	34,23 kN	71,35 kN													
	37,87 kN	37,87 kN													
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th style="text-align: center;">V_C</th> <th style="text-align: center;">V_{SK}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$VC1 ==>$</td> <td style="text-align: center;">0,00 kN</td> <td style="text-align: center;">386,30 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">34,23 kN</td> <td style="text-align: center;">71,35 kN</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">37,87 kN</td> <td style="text-align: center;">37,87 kN</td> </tr> </tbody> </table>				V_C	V_{SK}	$VC1 ==>$	0,00 kN	386,30 kN		34,23 kN	71,35 kN		37,87 kN	37,87 kN
	V_C	V_{SK}													
$VC1 ==>$	0,00 kN	386,30 kN													
	34,23 kN	71,35 kN													
	37,87 kN	37,87 kN													
RC = RS $0,95 * F_{ck} * B_w * 0,8 * x = A_s * F_s$ $x = 50,3 \text{ mm}$	GARRAFA PET $D_{PET} = 70,00 \text{ mm}$ $A_{PET} = 3848,45 \text{ mm}^2$ $V_{PET} = 600,00 \text{ ml}$														
$MR_{KC} = A_s * F_{ys} * (d - 0,4 * x)$ $MR_{KC} = 72,9 \text{ kN.m}$	ÁREA DE CONCRETO SEGMENTOS DE PET 3 $\text{ÁREA}_{VAZADA} = 11545,35 \text{ mm}^2$ $\text{ÁREA}_{MAIÇA} = 44850,00 \text{ mm}^2$ $\text{ÁREA}_{CONCRETO} = 33304,65 \text{ mm}^2$														
$M_s = MR_{CK}$ $(P/2) * a = MR_{KC}$ $P_{FLEX} = 194,40 \text{ kN}$ $P_{FLEX} = 19,44 \text{ Tf}$															