

EDUARDO MATTOS

ANÁLISE E PROJETO ESTRUTURAL DE RESERVATÓRIO DE  
MÁQUINA DE LAVAR PISOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo,  
para obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Automotiva.

SÃO PAULO  
2005

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

EDUARDO MATTOS

ANÁLISE E PROJETO ESTRUTURAL DE RESERVATÓRIO DE  
MÁQUINA DE LAVAR PISOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo,  
para obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Automotiva.

Área de Concentração: Engenharia Automotiva

Orientador: Prof. Dr. Edison Gonçalves

SÃO PAULO  
2005

Aos Meus Pais: Eduardo e Super Tina

A companheira Sofia

Aos Meus Irmãos: Janaína e Vinícius

AVaninha, Rafael, a valente Tia Yara,

Família e Amigos

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Edison Gonçalves pela abertura, envolvimento e orientação.

Aos amigos da Plataforma-Renotex e especialmente ao Sr. Eduardo Pereira de Mattos, professor persistente e empreendedor corajoso, pela grande oportunidade e confiança depositada ao longo desses anos.

Ao Nelson Cárdenas Oliver pela colaboração e acolhimento no Centro de Estruturas Navais e Oceânicas (CENO).

Aos colegas da TRM Resinas Termoplásticas.

Ao Ciro José Alves pela amizade e parceria nesse curso.

As atenciosas colegas Mônica e Rosângela.

**MUITO OBRIGADO!!**

## ÍNDICE

LISTA DE TABELAS.....	III
LISTA DE FIGURAS.....	IV
RESUMO.....	VI
ABSTRACT.....	VII
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Generalidades .....	1
1.2 Relevância .....	6
1.3 Escopo .....	6
CAPÍTULO II – CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL.....	7
2.1 Generalidades .....	7
2.2 Classificação dos Polímeros Estruturais.....	8
2.3 Características do Polietileno .....	10
2.4 Características do Processo de Fabricação .....	11
2.5 Estados Físicos dos Polímeros Estruturais .....	16
2.6 Características do Comportamento Tensão - Deformação nos Polímeros Estruturais.....	18
2.7 Comportamento Visco-Elasto-Plástico dos Polímeros.....	20
2.8 Comportamento a Fratura dos Polímeros .....	22
2.9 Propriedades Mecânicas do Material Utilizado.....	26
CAPÍTULO III – PROCEDIMENTOS DE PROJETO.....	30
3.1 Generalidades .....	30
3.2 Análise Visco-Elasto-Plástica .....	35
3.3 Análise à Fratura.....	39
3.4 Análise Tensão-Deformação .....	44
3.5 Características do Reservatório .....	46
3.5 Análise Preliminar .....	47
CAPÍTULO IV – ANÁLISE NUMÉRICO-COMPUTACIONAL.....	52
4.1 Representação do Modelo Físico.....	52

4.2 Método dos Elementos Finitos .....	53
4.3 Resultados da Análise - Reservatório 1 .....	56
4.6 Discussão dos Resultados .....	58
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
APÊNDICES	
APÊNDICE A – DESENHO RESERVATÓRIO DE RECOLHIMENTO .....	I
APÊNDICE B – FICHA TÉCNICA DA BOMBA DE VÁCUO.....	II
APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	III
APÊNDICE D – RESULTADOS DAS ANÁLISES POR ELEMENTOS FINITOS.....	XVIII

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-	Propriedades mecânicas do polietileno RA34-U3 injetado.....	26
Tabela 2.2-	Propriedades mecânicas do polietileno RA34-U3 rotomoldado.....	27
Tabela 4.1-	Resultados das análises de elementos finitos.....	56



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-	Máquina de lavar pisos do tipo pedestre.....	03
Figura 1.2-	Máquina de lavar pisos do tipo homem a bordo.....	04
Figura 2.1-	Variações da cadeia do polietileno.....	11
Figura 2.2-	Etapas do processo de rotomoldagem.....	13
Figura 2.3-	Curvas tempo x temperatura para o processo de rotomoldagem.....	14
Figura 2.4-	Relação tempo de cura x resistência ao impacto – Izod.....	16
Figura 2.5-	Relação tempo de cura x tensão máxima.....	16
Figura 2.6-	Estados físicos dos polímeros estruturais.....	18
Figura 2.7-	Curvas tensão-deformação para diferentes tipos de polímeros.....	20
Figura 2.8-	Ensaio de fluência e módulo de relaxação.....	21
Figura 2.9-	Curvas do logaritmo do módulo de relaxação x logaritmo do tempo para o polietileno.....	22
Figura 2.10-	Formação da trinca em polímero vítreo.....	24
Figura 2.11-	Curvas tensão-deformação dos corpos de prova ensaiados.....	27
Figura 2.12-	Curva tensão-deformação média dos corpos de prova ensaiados.....	28
Figura 2.13-	Segmento elástico da curva do ensaio de tração.	29
Figura 3.1-	Ciclo de vida do projeto segundo a velocidade de desenvolvimento.....	32
Figura 3.2-	Espiral de desenvolvimento de produto.....	33
Figura 3.3-	Fluxograma das atividades do projeto estrutural.....	34
Figura 3.4-	Modelos empregados para simular o comportamento mecânico dos polímeros e as respectivas curvas tensão-deformação.....	36
Figura 3.5-	Modelo sólido linear padrão.....	38
Figura 3.6-	Idealização da região descarregada nas proximidades da trinca.....	40
Figura 3.7-	Balanço de energia de fratura.....	41
Figura 3.8-	Trinca aguda em lâmina infinita tencionada uniformemente.....	41
Figura 3.9-	Diferentes modos de carregamentos que originam trincas em sólidos.....	43

Figura 3.10-	Critério de Von Mises.....	45
Figura 3.11-	Ilustração da lavadora de pisos no projeto básico.....	46
Figura 3.12-	Conjunto do reservatório de recolhimento desmontado.....	47
Figura 3.13-	Ilustração da chapa com as dimensões da lateral do reservatório.....	48
Figura 3.14-	Foto do reservatório de recolhimento 1.....	50
Figura 4.1-	Ilustração da condição de apoio do reservatório de recolhimento.....	52
Figura 4.2-	Ilustração do carregamento e vínculos.....	53
Figura 4.3-	Elemento de casca “Shell 63”.....	56
Figura 4.4-	Deslocamentos totais (USUM) reservatório 1.....	57
Figura 5.1-	Máquina de lavar pisos Renotex.....	59

## RESUMO

O presente trabalho é um estudo de caso do projeto de um reservatório plástico aplicado em máquinas de lavar pisos, empregadas em atividades de limpeza e conservação. A utilização destas máquinas tem como objetivo executar a limpeza com menor esforço humano e maior produtividade e economia de água, para isto injetam uma solução de limpeza, escovam o piso proporcionando a ação mecânica necessária e por fim recolhem a emulsão da solução com os detritos da superfície.

Ensaio de tração foram executados conforme a norma ASTM D638 em cinco corpos de prova, fabricados através de usinagem de amostras do material do reservatório. Após os testes foi possível obter as propriedades reais do material processado, necessárias para a análise estrutural.

O estudo foi desenvolvido durante o projeto de um novo produto, e propõe um procedimento para o dimensionamento estrutural de reservatórios de recolhimento utilizados nestes equipamentos. Os resultados desse estudo permitiram a fabricação do reservatório em uma só peça, sem a necessidade de incluir outros componentes estruturais. Diferentes geometrias foram propostas e ensaiadas pelo método dos elementos finitos, obedecendo às restrições impostas pelo projeto e processo de fabricação. A solução encontrada foi aplicada ao desenvolvimento de uma lavadora de pisos nacional.

## **ABSTRACT**

The aim of the present study is to show the structural design procedure of rotomolded reservoir, used in floor scrubber machine. Scrubbers are professional cleaning equipment that inject cleaning solution, scrubber and recovers the dirt solution from the floor. The use of such equipment has as objective the improvement of the productivity and quality of the cleaning activities.

One recovery tank prototype was made to measure the displacement acting in the side walls of the reservoir and to help in selecting the best model to represent the real displacement.

In accordance with ASTM D638 standard, tensile test specimens were machined from the obtained prototype. After the tensile test, it was possible to get the mechanical properties of the rotomolded polyethylene, necessary for the structural analyses.

The study was developed as part of the project of a new scrubber and it can be a start point for future developments of reservoirs used in such kind of machines. The results obtained allow to manufacture single piece machine reservoir, without the use of other structural elements, necessary to reduce the deformation, as observed in the tests with the first prototype. Different geometries was molded and analyzed according to Finite Element Method (FEM) and the best structural configuration was used to manufacture the new scrubber reservoir.

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Generalidades

Nos últimos 10 anos ocorreram profundas mudanças nas formas como os negócios são conduzidos em relação ao meio ambiente. Vivemos em uma era em que a qualidade ambiental tornou-se muito importante para as pessoas. O meio ambiente deixou de representar uma inesgotável fonte fornecedora de recursos e passou a ser encarado como um patrimônio a ser preservado.

O sucesso de programas de gestão ambiental depende do uso e desenvolvimento de ferramentas, tecnologias e sistemas viáveis que reduzam os níveis de poluição e desperdício de recursos. Limpeza, manutenção e restauração são processos fundamentais na gestão ambiental, [1].

A limpeza pode ser definida como o processo de localizar, identificar, armazenar e descartar substâncias indesejadas de forma apropriada, [2].

Em termos mundiais, a gestão ambiental é um dos segmentos de maior crescimento, e o aumento da demanda não pode ser apenas justificado pelas regulamentações governamentais, mas também pela crescente consciência de preservação ambiental das pessoas. Atualmente nos EUA, o segmento de prevenção e controle de poluição é uma indústria de US\$ 160 bilhões ao ano e emprega cerca de 3.5 milhões de pessoas, direta ou indiretamente. Se acrescentarmos a esse mercado os valores do segmento de limpeza e conservação, incluindo as empresas prestadoras de serviço, esse valor atinge a cifra de US\$ 200 bilhões ao ano. Estes dados revelam o montante gasto anualmente para limpar e manter os ambientes internos e externos saudáveis, [1].

Estudos realizados pela Tennant Corporation, de Mineapolis, Minnesota - EUA e apresentados pela CEO Janet Dolan durante o encontro anual de distribuidores realizados na cidade de Guanajuato no México em 2000, revelaram, [2]:

- O mercado mundial de máquinas lavadoras e varredeiras de uso comercial e industrial são de U\$ 5 bilhões;
- A tendência de crescimento é de 6% ao ano para a década.

Em 2002 uma pesquisa conduzida pela Press Publishing Corporation, responsável pela edição da revista “Sanitary Maintenance Magazine”, revelou que as vendas de equipamentos realizadas por distribuidores nos EUA em 2001, alcançaram U\$ 1,48 bilhões, sem incluir as vendas diretas de fábrica.

No Brasil, pesquisa realizada pela ABRALIMP para o segmento de máquinas durante os anos de 2002, 2003 e 2004 apresentou números muito distantes dos realizados no mercado norte-americano. Entre as razões para essa diferença destacam-se, [2]:

- O baixo custo da mão de obra;
- A predominância da prática de venda de número de pessoas por contrato, e não de atividades, nas negociações entre prestadores de serviços de limpeza e clientes;
- Falta de cultura setorial, resultando em baixo grau de informação com relação aos processos e recursos de limpeza, das pessoas que gerenciam atividades ou contratos de limpeza;
- A existência de poucos fabricantes nacionais desses produtos e a baixa qualidade de alguns modelos;
- Os altos preços das máquinas e peças de reposição importadas;

As máquinas de lavar pisos são utilizadas na limpeza de ambientes internos e externos em indústrias, hotéis, hospitais, supermercados, shoppings centers e outros onde existe a

necessidade de manutenção de espaços amplos com qualidade, produtividade e redução do desperdício de recursos, entre eles a água.

Essas máquinas efetuam a limpeza através das operações de injeção da solução de limpeza, escovação e recolhimento dessa junto aos detritos presentes no piso. Estes produtos são compostos por reservatórios para o armazenamento das soluções limpas e sujas, motores elétricos, bombas de vácuo, mangueiras, rodos, elementos de controle e comando além de muitos outros para sustentação e condução da máquina. Exemplos dessas máquinas são apresentados na **Figura 1.1** [3] e **Figura 1.2**, [4].



**Figura 1.1:** Máquina de lavar pisos do tipo pedestre de 20”, [3].

Quanto à forma de condução, essas máquinas podem ser classificadas em dois grupos: pedestre, onde a atividade é realizada com o operador em pé e atrás da máquina, **Figura 1.1** e homem a bordo, neste o operador realiza o trabalho sentado sobre a máquina, **Figura 1.2**. As lavadoras do tipo pedestre podem ou não possuir tração mecânica, o que depende muito da capacidade dos reservatórios, dimensões e massa total do equipamento. A seleção do modelo ideal deve considerar a produtividade de limpeza desejada e as características do espaço a ser

mantido. A produtividade destas máquinas varia entre 9,0 e 3,0 minutos para lavagem de 100m<sup>2</sup>, respectivamente para equipamentos de 17”e 36” de faixa de limpeza [5]. Na **Figura 1.1** é apresentada um modelo com homem a bordo, empregada na limpeza de áreas planas com grandes espaços livres para manobra.



**Figura 1.2:** Máquina de lavar pisos do tipo homem à bordo, [4].

Vale citar que a lavagem com lavadoras apresenta grande vantagem na economia de água para a limpeza de uma mesma área, comparado a outros processos, tais como os que utilizam máquinas hidrojateadoras.

Dados da Organização das Nações Unidas revelam que o aumento da demanda por água subiu de seis a sete vezes nos últimos dez anos, e que em 2025 um terço da humanidade terá problemas de abastecimento. Esses dados alertam para o aprimoramento de processos e eliminação de desperdício na utilização desse recurso, [6].

A limpeza de uma área utilizando uma máquina lavadora de 20” consome aproximadamente 50 litros em uma hora, se for utilizado uma hidrojateadora pequena durante o mesmo período, o consumo será de 450 litros [6]. A utilização de hidrojateadoras para a lavagem de pisos apresenta também a desvantagem do descarte indevido da água com os produtos químicos de



limpeza e sujeira, enquanto a máquina lavadora recolhe a solução suja para o descarte em local apropriado.

Este estudo enfoca a análise e o projeto estrutural de um reservatório de máquina de lavar pisos.

A máquina do projeto em questão é semelhante ao modelo apresentado na **Figura 1.1**, [3].

Historicamente, quanto ao desenvolvimento dos reservatórios, vale lembrar que os fabricantes dessas máquinas utilizaram diferentes formas construtivas ao longo das gerações desses produtos. Os primeiros produtos foram desenvolvidos com reservatórios fabricados com chapas de aço inoxidável, que foram empregados até o final da década de 70. Depois, a moldagem com polímeros termorrígidos e fibra de vidro foi adotada pela maioria dos fabricantes, porém a fabricação das peças era lenta e trabalhosa, além de não ser reciclável. Atualmente a maior parte dos fabricantes optou pela rotomoldagem como processo de fabricação desses componentes. O processo de rotomoldagem apresenta grandes vantagens na geração de componentes ocos e de geometria complexa, permitindo a criação de componentes grandes e com formas variadas em uma só peça, sem emendas ou processos adicionais. Dessa forma, os projetistas de máquinas de limpeza desenvolvem componentes multifuncionais em uma peça, ou seja, um só componente pode acumular as funções de reservatório, elemento de sustentação e carenagem, por exemplo. Os componentes rotomoldados aplicados em máquinas de limpeza geralmente são espessos e resistentes. As atividades exigem máquinas robustas cujo projeto deve considerar quedas e choques frequentes com objetos de mobília e paredes. O polietileno é o material mais empregado e apresenta boa resistência aos produtos químicos empregados nos processos de limpeza.

Alguns fabricantes norte americanos chegam a oferecer 10 anos de garantia para os componentes rotomoldados, tornando a qualidade do projeto e fabricação dessas peças vital para a competitividade do produto final no mercado.

## **1.2 Relevância**

Os resultados deste trabalho foram determinantes para a conclusão do projeto de um novo modelo de máquina de lavar pisos. O lançamento da máquina aumentou a oferta de modelos presentes no mercado nacional, permitindo a ampliação dos benefícios na qualidade, na produtividade e na redução do desperdício de recursos nos processos de limpeza.

O procedimento de projeto aplicado ao desenvolvimento do reservatório de recolhimento fornece maior confiabilidade ao produto, ao eliminar a alternativa de inclusão de armação metálica no interior do reservatório, e ao analisar os níveis de tensão atuantes na peça.

O aprendizado conquistado possibilita a redução do tempo de projeto em novos desenvolvimentos dessa categoria de máquina.

## **1.3 Escopo**

O presente trabalho é um estudo de caso do projeto estrutural de um reservatório plástico aplicado em máquina de lavar pisos. Nos capítulos seguintes são tratados alguns conceitos relevantes ao desenvolvimento do tema nas áreas de materiais, projeto e análise computacional.

O capítulo II explora as principais características dos polímeros, as propriedades mecânicas do material utilizado e uma visão geral do processo de rotomoldagem necessária ao desenvolvimento do projeto do reservatório, que será abordado no capítulo III.

No capítulo III são apresentados alguns conceitos de gerenciamento de projetos e os critérios de projeto aplicado ao desenvolvimento estrutural do reservatório. As análises computacionais são realizadas e os resultados discutidos no capítulo IV. As conclusões e recomendações são descritas no capítulo V.

## CAPÍTULO II

### CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL

#### 2.1 Generalidades

A utilização dos polímeros estruturais tem crescido em larga escala na indústria e as principais vantagens da utilização desses materiais são, [8]:

- a) Em temperatura ambiente, apresentam módulo de elasticidade considerado adequados para o uso estrutural;
- b) Peso reduzido comparado aos metais e cerâmicas;
- c) Facilidades de fabricação e processamento;
- d) Menor custo energético de fabricação e transformação;
- e) Boa resistência ao impacto;
- f) Eliminação de tratamento contra o fenômeno de corrosão;
- g) Bom isolamento elétrico e térmico;
- h) Baixo custo de acabamento;

Os polímeros são materiais constituídos por moléculas de elevado peso molecular, chamadas macromoléculas, nas quais os átomos das cadeias são unidos por ligações covalentes, [8].

Estas moléculas são compostas por grande número de pequenas unidades químicas repetidas, os monômeros, que se arranjam em cadeias longas formadas por três tipos gerais de reação: a poliadição, a policondensação e a modificação química de outro polímero. Na reação de poliadição, os monômeros na maioria dos casos apresentam duplas ligações entre os átomos de carbono e os pesos moleculares podem atingir valores altos, na faixa de  $10^5$ - $10^6$ . Para essa reação não há a formação de subprodutos. O polietileno, o polipropileno e o poliestireno são alguns exemplos de polímeros formados pela reação de poliadição. Na reação de policondensação há a formação de subprodutos, que precisam ser removidos e os pesos

moleculares são inferiores aos obtidos pela reação de poliadição, sendo da ordem de  $10^4$ . Polímeros como o poliuretano, a poliamida 6 e o policarbonato são exemplos de polímeros formados por reação de policondensação. A modificação de polímeros resulta de reações químicas sobre polímeros existentes, naturais ou sintéticos. A mudança de propriedades elétricas, no peso molecular, na solubilidade, na resistência mecânica, etc., possibilita uma ampla gama de aplicações. O polietileno clorado, o nitrato de celulosa e o poli(cloreto de vinila)clorado entre muitos outros, são alguns exemplos de polímeros obtidos pela modificação química de outros polímeros.

## **2.2 Classificação dos Polímeros Estruturais**

Os polímeros são divididos em três grandes grupos:

- a) Termoplásticos;
- b) Termorrígidos ou termofixos;
- c) Elastômeros

Os termoplásticos são formados por cadeias moleculares bidimensionais unidas por forças secundárias fracas, forças de Van der Waals, que permitem os movimentos individuais das cadeias. Estes materiais são sensíveis às mudanças de temperatura, amolecendo quando aquecidos (eventualmente se liquefazendo) e endurecendo quando resfriados. Para esses polímeros este processo é completamente reversível e pode ser repetido.

Alterações de temperatura e pressão provocam a redução das forças de ligação secundária, devido ao aumento do movimento molecular, de tal modo que o movimento relativo das cadeias adjacentes é facilitado com a aplicação de uma sollicitação mecânica. O fenômeno de degradação acontece quando a vibração molecular atinge níveis capazes de romper as ligações covalentes primárias, [9].

Os termoplásticos podem ainda ser divididos em amorfos e cristalinos. Os termoplásticos amorfos como o PVC, o ABS e o policarbonato são caracterizados por não possuírem estrutura cristalina. Os termoplásticos amorfos e essencialmente todos os termorrígidos, apresentam somente uma transição térmica que é a temperatura de transição vítrea. Por outro lado os termoplásticos cristalinos apresentam uma estrutura molecular organizada mesmo acima da temperatura de transição vítrea. O polietileno é um exemplo de termoplástico cristalino, nele a temperatura de transição vítrea é de aproximadamente  $-100^{\circ}\text{C}$  e a temperatura de fusão próxima a  $135^{\circ}\text{C}$ . A estrutura cristalina do polietileno permite que ele mantenha a forma mesmo quando submetido a temperaturas superiores a  $200^{\circ}\text{C}$  acima da  $t_g$ , [10].

Os termorrígidos são formados por uma estrutura reticulada de cadeias moleculares tridimensionais unidas por enlaces covalentes primários muito fortes que impedem os movimentos individuais das cadeias. Eles tornam-se permanentemente duros e não amolecem mesmo quando são aquecidos. A estrutura reticulada é formada pelo estabelecimento de ligações covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes. Estas ligações ancoram as cadeias entre si de forma a suportar a vibração e movimento das cadeias em temperaturas elevadas.

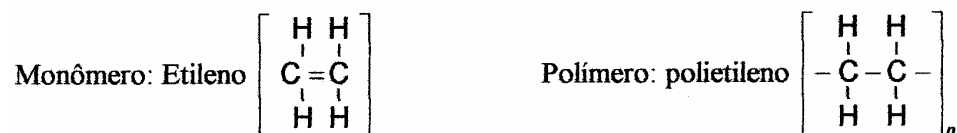
A degradação somente ocorre na presença de elevadíssimas temperaturas, que são capazes de romper as ligações cruzadas entre as cadeias, [9]. Estes polímeros são normalmente duros, fortes e mais frágeis que os termoplásticos, porém possuem melhor estabilidade térmica.

Os elastômeros não se cristalizam facilmente, são amorfos e as cadeias “enroladas” respondem prontamente ao esforço aplicado. O escorregamento entre as cadeias é prevenido pelo ancoramento devido às ligações cruzadas entre as cadeias. A reticulação nos elastômeros é realizada na maioria dos casos pelo processo de vulcanização.

### 2.3 Características do Polietileno

O polietileno é obtido através da reação de polimerização por adição do etileno ( $C_2H_4$ ) sob condições controladas de temperatura e pressão. Sob altas pressões, de 1 a 2Kbar, e altas temperaturas, de 100 a 300°C, obtém-se polietileno de baixa densidade (LDPE) que é caracterizado por moléculas bastante ramificadas. Diminuindo-se a pressão abaixo de 30 bar e temperaturas de 40 a 150°C e com catalisadores muito ativos obtém-se o polietileno de alta densidade (HDPE) caracterizado por moléculas lineares longas [11].

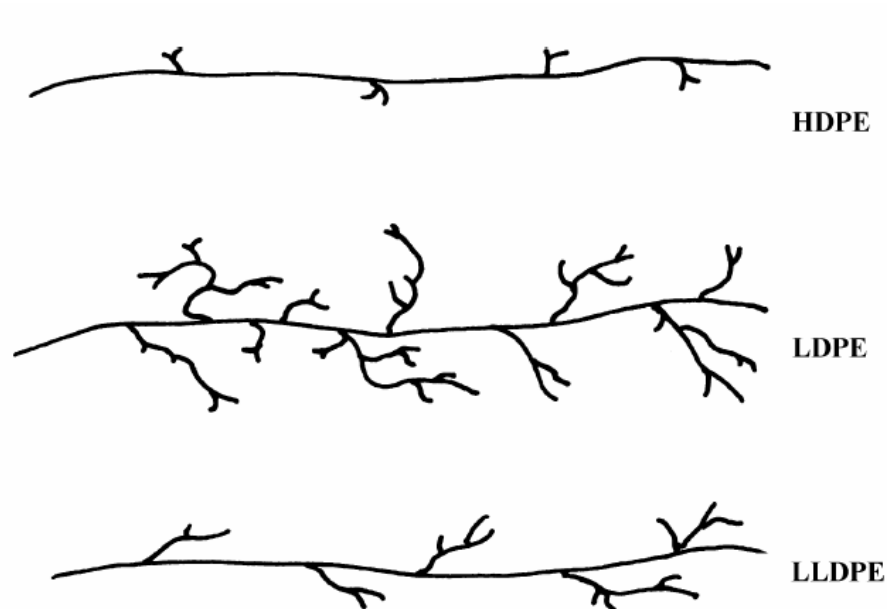
Abaixo é apresentada a estrutura química dos polietilenos:



Dependendo do numero de moléculas o polietileno assume diferentes produtos. Quando  $x$  é da ordem de 50, a molécula é uma cera de alta temperatura. Se  $x$  assume valores da ordem de 500, o polímero é um polietileno de baixo peso molecular. Quando  $x$  é de cerca de 2500, o polímero é um polietileno cristalino de alto peso molecular. Para valores de  $x$  da ordem de 250.000 o polímero é um polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE). A temperatura de amolecimento e a densidade do polímero aumentam com o aumento de  $x$ , [10].

As variações do polietileno também são caracterizadas pela extensão e número de cadeias laterais. O polietileno de baixa densidade possui cadeias laterais longas a cada comprimento de 100 ou mais unidades de etileno. O polietileno de média e o polietileno de alta densidade possuem um número menor de cadeias laterais mais curtas. O polietileno linear de baixa densidade tem o mesmo número de cadeias laterais do polietileno de baixa, porém mais curtas

devido ao emprego de catalisadores e agentes corretivos apropriados. A **Figura 2.1** [10] a seguir, ilustra os diferentes tipos de cadeias de polietileno.



**Figura 2.1:** Variações das cadeias do polietileno, [10].

#### 2.4 Características do Processo de Fabricação

Como mencionado anteriormente, o processo de rotomoldagem é amplamente utilizado na fabricação dos reservatórios e outros componentes plásticos de máquinas de limpeza.

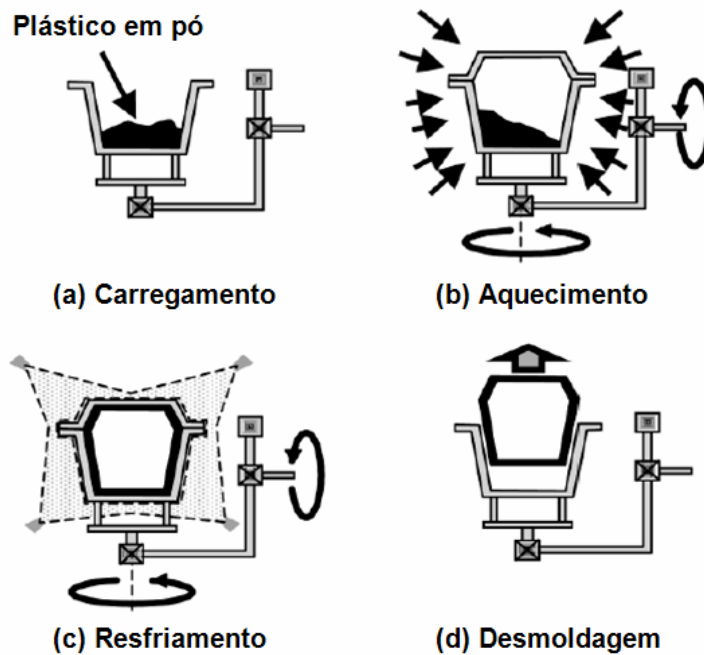
O polietileno utilizado para rotomoldagem tem que ser processado na forma micronizada ou em micropellets, sendo a última forma um desenvolvimento mais recente e, portanto ainda rara nos transformadores. A micronização é realizada em moinhos e o tamanho da partícula recomendado e amplamente utilizado para a moldagem do polietileno é de 500 microns ou malha americana 35.

A distribuição do tamanho da partícula exerce influência nas características de fluxo e fusão do pó durante a moldagem. A produção comercial de pós de tamanho específico é difícil, porém as quantidades de frações grossas e finas devem ficar dentro de certos limites. Desta

forma, o tamanho da partícula e a distribuição do tamanho, para cada carga de pó, deverão ser determinados pela análise da peneira conforme o método do teste ASTM D 1921-63 (1970), onde uma amostra é passada através de uma série de telas de tamanho padrão. O menor tamanho de tela que permite a passagem de 95% da amostra de pó define o tamanho da partícula.

A rotomoldagem é um processo de fabricação ideal e eficaz para produção de peças ocas, sem costuras ou emendas, parcialmente ou totalmente fechadas. O processo de moldagem consiste basicamente da introdução de uma quantidade definida de plástico micronizado ou líquido no interior do molde, que depois de fechado, gira em torno de dois eixos principais em baixas velocidades (tipicamente de 4 a 20revs/min). O molde é aquecido, e a combinação do calor com os movimentos rotativos permite que o plástico fundido forme uma camada sobre toda a superfície interna do molde. No resfriamento, a manutenção do movimento rotativo faz com que a camada formada mantenha a geometria da cavidade do molde enquanto se solidifica. Quando o plástico está suficientemente rígido, o resfriamento e as rotações são parados e o molde é aberto para que a peça seja extraída. Neste momento, um novo ciclo pode ser iniciado com a inclusão de nova carga de plástico. As etapas básicas de carregamento, aquecimento, resfriamento e desmoldagem são ilustradas na **Figura 2.2** [10].

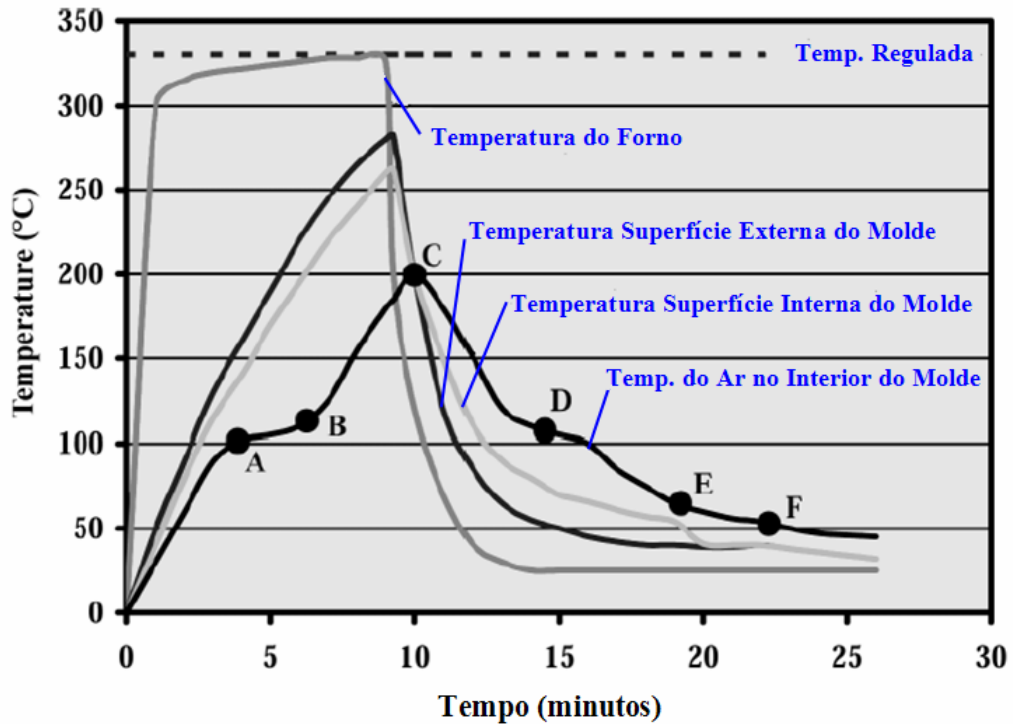




**Figura 2.2:** Etapas do processo de rotomoldagem, [10].

Na grande maioria dos casos, o aquecimento é realizado dentro de um forno, e o monitoramento através de equipamento apropriado possibilita o acompanhamento da relação tempo-temperatura em algumas posições do sistema. Os formatos das curvas geradas pelo monitoramento se repetem para os materiais e processos mais utilizados, especialmente para a curva da temperatura do ar no interior do molde. Na **Figura 2.3** as curvas típicas para um ciclo de rotomoldagem são apresentadas.

No gráfico da figura a temperatura do forno foi regulada para 330°C. Quando o ciclo inicia, a temperatura no interior do forno aumenta imediatamente, entretanto, o aumento da temperatura nas superfícies do molde, do plástico e do ar no interior do molde ocorre após alguns minutos.



**Figura 2.3:** Curvas tempo x temperatura para o processo de rotomoldagem, [10].

A curva da temperatura do ar no interior do molde, revela informações importantes das etapas do processo. Até o ponto “A” não há aderência de plástico nas paredes do molde, isso começa a acontecer a partir deste ponto. Para o polietileno a aderência ocorre quando o ar no interior do molde atinge cerca de 100°C. A velocidade de aumento da temperatura do ar no interior do molde diminui em razão da absorção de energia térmica durante a fusão do plástico. No ponto “B” todo o plástico encontra-se aderido na superfície do molde, eliminando a circulação de pó livre pelo molde. No seguimento “BC” há um aumento considerável na taxa de aumento da temperatura, que provoca o adensamento da massa plástica até a fusão completa do pó. Neste estágio, a parede torna-se uma massa uniforme e a dissolução das bolhas ao longo da espessura plástica deve ser facilitada. Para o polietileno a temperatura de 200°C marca o fim desta etapa, momento em que o molde deve ser removido do forno. Com o molde fora do forno a temperatura começa a abaixar, e a taxa de resfriamento é determinante em algumas propriedades da peça final. A resistência ao impacto e a contração são propriedades afetadas

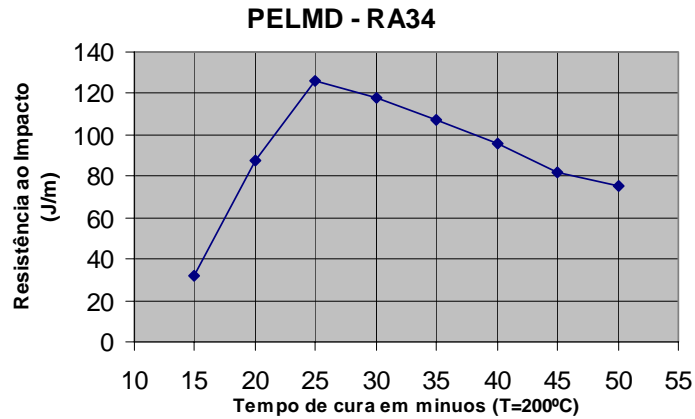
diretamente pela taxa de resfriamento. O ponto “D” marca a solidificação completa da espessura plástica. Com o plástico solidificado, a taxa de resfriamento exerce menor influência nas propriedades da peça moldada. O ponto “E” marca a separação da peça da superfície do molde, onde uma camada de ar é formada entre a peça e o molde. É interessante notar que a partir desse ponto não existe diferença prática entre as temperaturas das superfícies interna e externa do molde. A temperatura em “F” corresponde ao instante da desmoldagem, quando o molde é aberto para a extração da peça.

A determinação do tempo de cura ideal exige a observação visual e o levantamento de propriedades mecânicas em peças produzidas com tempos de ciclo diferentes, que indicam o estado de cozimento ou cura da peça. Uma peça processada adequadamente apresenta propriedades físicas plenamente desenvolvidas, tais como resistência ao impacto em baixas temperaturas e resistência a rachaduras sob pressão, nessas peças o preenchimento é bom e a superfície interna é lisa, opaca e da mesma cor que o lado externo da peça.

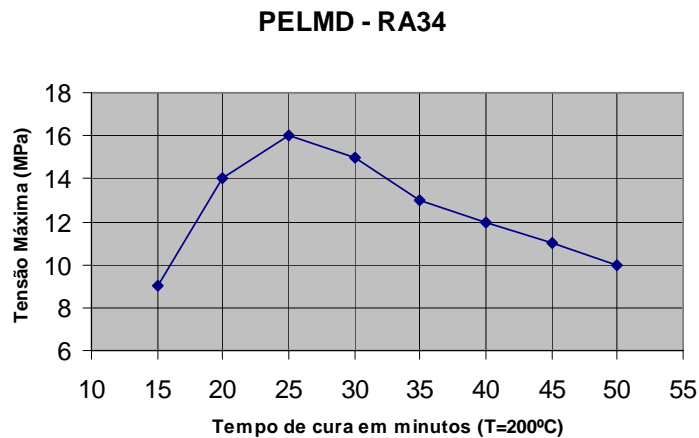
Uma peça com cozimento deficiente ou sub-curada apresenta preenchimentos inadequados, ásperos e uma superfície interna pulverulenta com bolhas de ar nas paredes e menor resistência ao impacto e limite de ruptura.

As peças hiper-curadas podem ser identificadas pelo forte odor de ácido acético imediatamente após a moldagem, uma diminuição no índice de fluidez e propriedades físicas prejudicadas que indicam a degradação do polímero. Visualmente a peça apresenta uma superfície lustrosa e com baixa coloração.

Especial atenção deve ser dada às condições de processo para o melhor aproveitamento das propriedades mecânicas do material utilizado. Na **Figura 2.4** [12] a relação entre o grau de cozimento e a resistência ao impacto é indicada, para o polietileno linear de média densidade em baixas temperaturas. A curva da **Figura 2.5** [12] mostra a relação entre o tempo de permanência no forno e o limite de resistência à tração.



**Figura 2.4:** Relação tempo de cura x resistência ao impacto - Izod, [12]



**Figura 2.5:** Relação tempo de cura x tensão máxima, [12]

## 2.5 Estados Físicos dos Polímeros Estruturais

Os polímeros estruturais podem se comportar como vítreos em temperaturas abaixo da temperatura de transição vítrea ( $t_g$ ), sendo o seu comportamento elástico em conformidade com a “lei de Hooke” e independente do tempo.

Para temperaturas superiores a temperatura de fusão ( $t_f$ ) os materiais poliméricos comportam-se como um líquido viscoso. Para temperaturas compreendidas entre a temperatura de transição vítrea e a temperatura de fusão, os materiais poliméricos exibem uma combinação

de características mecânicas intermediárias dos dois estados anteriores, que é denominada de visco-elasticidade.

Na **Figura 2.6**,[13], o comportamento mecânico para os três estados físicos mencionados é ilustrado. No gráfico a solitação (a) é representada entre os intervalos  $T_a$  e  $T_r$ , que é respectivamente o tempo de aplicação e remoção da carga.

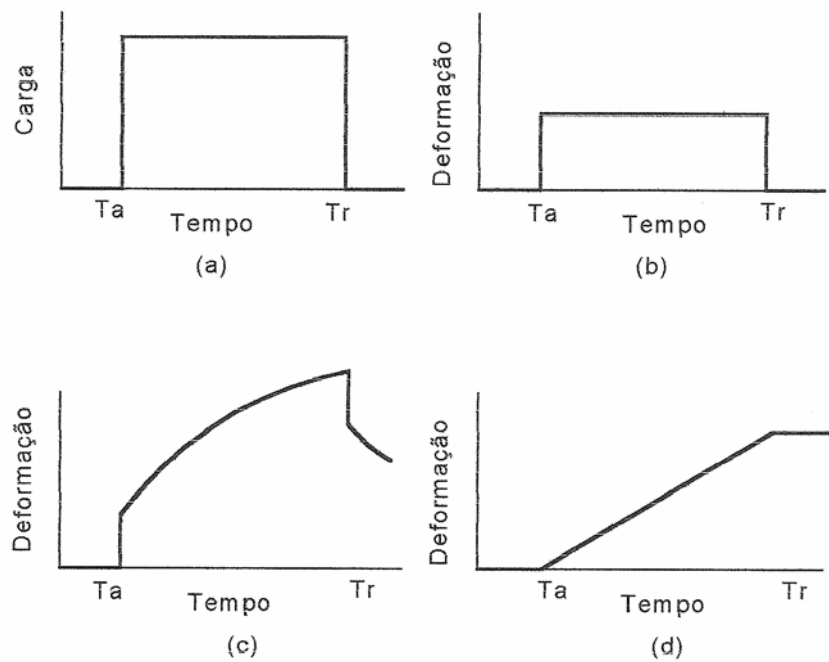
No estado vítreo, ou seja, para uma temperatura de aplicação da carga menor que  $t_g$ , a deformação origina-se instantaneamente com a carga e é constante dentro do intervalo definido por  $T_a$  e  $T_r$ . Ao remover a carga, a deformação é recuperada e o material volta a suas dimensões originais.

A uma temperatura maior que  $t_g$ , a agitação térmica das cadeias poliméricas é capaz de provocar uma resposta elástica retardada e um escoamento viscoso. Com a remoção da carga, a deformação elástica é recuperada, porém a viscosa se mantém, fazendo com que a deformação total seja recuperada parcialmente.

Este estado é chamado de elasticidade entrópica atrasada ou de couro, “leather state”. A **Figura 2.6** (c) representa este estado e o módulo elástico converte-se numa função da deformação e do tempo.

Na **Figura 2.6** (d) pode-se verificar que a deformação ou alongamento não é instantâneo, ou seja, em resposta a aplicação da carga, a deformação é função do tempo. Com a retirada da carga a deformação não é totalmente recuperada.

Vale observar que a diferenciação entre estes estados físicos nem sempre é clara e prática. Os termoplásticos empregados em estruturas de engenharia são usados quase sempre nos estados apresentados nas figuras 2.6 (b) e 2.6 (c).



**Figura 2.6:** Estados físicos dos polímeros estruturais, [13].

## 2.6 Características do Comportamento Tensão - Deformação nos Polímeros Estruturais

Quanto aos modos de deformação, pode-se citar três comportamentos diferentes para os polímeros de engenharia, [14]:

- a) Elasticidade Pura
- b) Elasticidade Entrópica
- c) Escoamento Viscoso

Os átomos nas cadeias poliméricas são mantidos nas suas posições por ligações covalentes, porém um deslocamento relativo entre eles ocorre quando submetidos à carga externa, provocando um aumento da energia interna. Ao se remover a carga os átomos retornam a suas posições de origem. Esse tipo de deformação é elástica e instantânea, e típica para os termorrígidos e para os termoplásticos abaixo da temperatura de transição vítrea ( $t_g$ ).

A deformação do tipo elasticidade entrópica caracteriza-se pelas conformações, que é a capacidade das cadeias poliméricas de girar em torno das ligações simples, criando arranjos

torcidos que mudam constantemente. Com a aplicação de uma carga externa de tração, ocorre um alinhamento molecular nesta direção e diminui a entropia das moléculas. Com a retirada da carga, continuam acontecendo mudanças na forma das moléculas, mas são preponderantes aquelas mudanças que aumentam a entropia das cadeias e busca o restabelecimento das posições anteriores a carga. Este processo não é instantâneo, e é dependente do tempo, chamando-se de visco-elástico.

O último tipo de deformação caracteriza-se pelo lento deslocamento das cadeias moleculares entre si, para novas posições que é o escoamento viscoso. As moléculas se movimentam após o fornecimento de energia térmica suficiente para o rompimento das forças de Van der Waals atuantes entre elas. Esta deformação é dependente do tempo e da temperatura.

Os testes tensão-deformação são os mais utilizados em avaliações mecânicas e os engenheiros têm grande familiaridade com os seus resultados. No entanto, devido a natureza visco-elástica dos polímeros, as curvas tensão-deformação oferecem informações pouco precisas para determinação do comportamento do polímero na forma e condições finais desejadas.

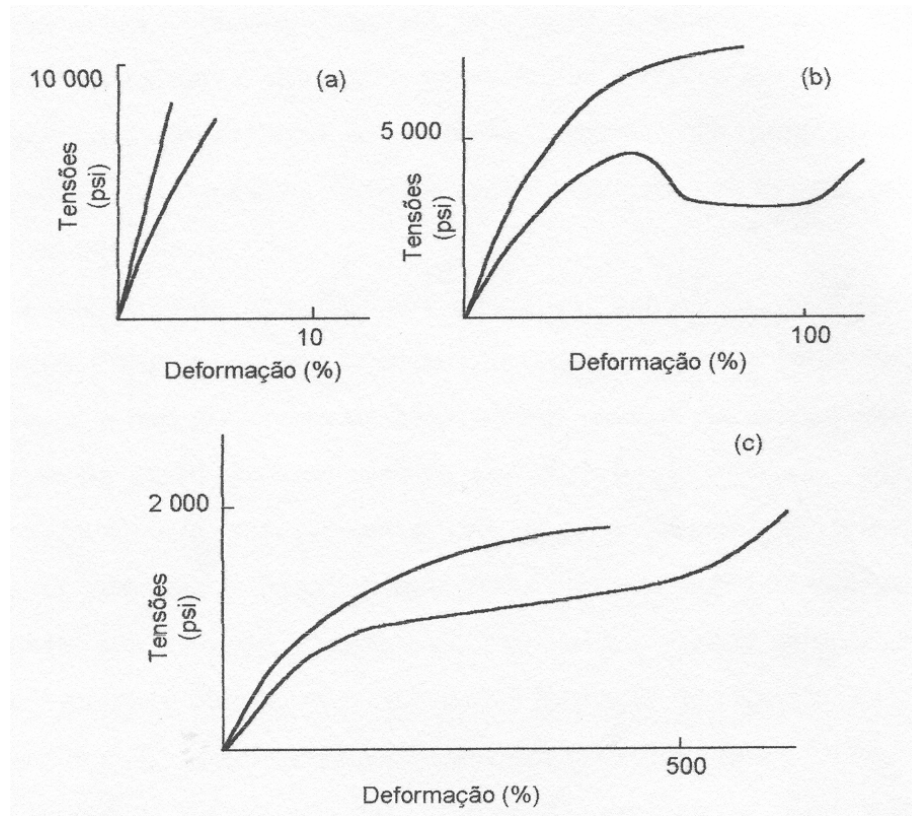
Para dar ao engenheiro ou designer a informação realmente necessária, são necessários ensaios em temperaturas diferentes, velocidades e outras condições; que requerem muito tempo e material [15].

Dessa forma, as curvas tensão-deformação oferecem uma indicação do módulo de elasticidade e da rigidez do material.

A **Figura 2.7** ilustra os comportamentos tensão-deformação para diferentes polímeros, com velocidades de deformação constante e idêntica para todas as curvas.

O gráfico (a) representa materiais duros e frágeis, enquanto as curvas em (b) são para polímeros duros e dúcteis. O comportamento em (a) é mais comum para os termorrígidos, que apresentam pouca deformação e são menos sensíveis a variações de temperatura. Os termoplásticos comportam-se como em (b), onde a deformação neste tipo de materiais pode

atingir 700% e as variações na temperatura e velocidades de ensaio exercem grande influência nos resultados. As curvas em (c) são típicas para os elastômeros.



**Figura 2.7:** Curvas tensão/deformação para diferentes tipos de polímeros, [15].

## 2.7 Comportamento Visco-Elasto-Plástico dos Polímeros

Os testes de Fluência e de Relaxação, respectivamente sob força e deformação constante, medem a estabilidade dimensional do material. Os ensaios podem ter longa duração, gerando informações práticas importantes para projetistas e interessados na teoria das propriedades mecânicas dos materiais.

Como pode ser observado através da **Figura 2.8** (a) o ensaio Fluência mede a deformação apresentada por um corpo de prova submetido a uma carga ou tensão constante. Se o material for rígido e frágil, o ensaio é realizado por flexão e não tração, fazendo com que a tensão na espessura do corpo de prova da peça não seja constante embora a carga seja constante. Neste

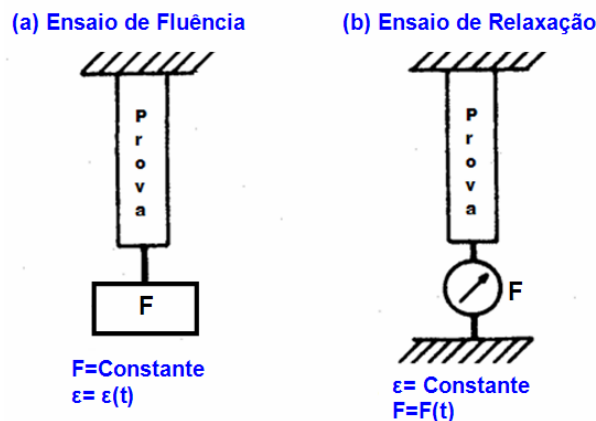


ensaio, a deformação aumenta com o tempo. Removendo-se a carga após certo tempo, há a tendência do corpo de prova retornar a forma e comprimento original. A curva de retorno pode ser obtida plotando-se o retorno da deformação em função do tempo.

Nos ensaios de Módulo de Relaxação, conforme a **Figura 2.8** (b) o corpo de prova é submetido rapidamente a uma deformação específica que é mantida constante e a tensão necessária para a manutenção dessa deformação é registrada ao longo do tempo. O módulo de relaxação ( $E_r$ ) que é um módulo elástico dependente do tempo pode ser calculado a partir da

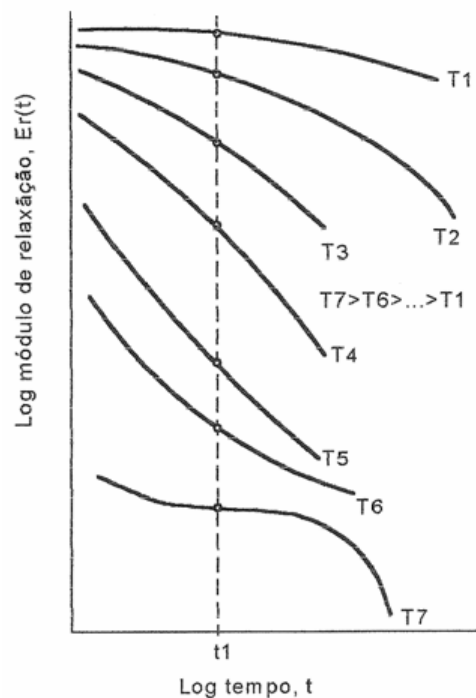
$$\text{equação: } E_r(t) = \frac{\sigma_{(t)}}{\varepsilon_0}$$

Onde  $\sigma_{(t)}$  é o valor da tensão dependente do tempo e  $\varepsilon_0$  o nível de deformação.



**Figura 2.8:** Ensaios Fluência e Módulo de Relaxação.

A **Figura 2.9**, [16], mostra as curvas do logaritmo do módulo de relaxação versus o logaritmo do tempo para um polietileno. A observação do gráfico permite concluir que há um decréscimo do módulo de relaxação com o tempo e com a temperatura.



**Figura 2.9:** Curvas do logaritmo do módulo de relaxação versus logaritmo do tempo para o polietileno, [16].

## 2.8 Comportamento a Fratura dos Polímeros

A fratura pode ser definida como o processo de separação de um corpo em duas ou mais partes devido à aplicação de tensão capaz de romper a resistência das ligações que mantêm as cadeias atômicas unidas.

Nos metais a fratura e o escoamento são mecanismos de falha concorrentes. A fratura frágil ocorre em materiais em que o escoamento é difícil. Metais dúcteis, por definição, experimentam deformação plástica extensiva antes da ocorrência da fratura. Temperaturas baixas, altas taxas de deformação e estado tri-axial de tensões tendem a suprimir o escoamento e favorecer a fratura. De forma geral, os conceitos válidos aos metais também podem ser considerados para os polímeros, no entanto os detalhes microscópicos do escoamento e da fratura são diferentes. Os polímeros não possuem os planos cristalográficos, descontinuidades e os contornos de grão dos metais e são formados por longas cadeias

moleculares. Nos polímeros existem dois tipos de ligações que governam a resposta mecânica: a ligação covalente entre os átomos de carbono, e as ligações secundárias de Van der Waals entre os segmentos da molécula. A fratura normalmente envolve a quebra das ligações principais, porém as ligações secundárias desempenham papel importante nos mecanismos de deformação que conduzem à fratura. Os fatores que influenciam a rigidez e ductilidade dos polímeros são: taxa de deformação, temperatura e estrutura molecular. Com altas taxas ou temperaturas baixas (relativa a  $t_g$ ) os polímeros tendem a ser frágeis, devido ao tempo insuficiente para o material responder com deformações visco-elásticas de larga escala ou escoamento.

Um fator que colabora para rompimento das ligações é o carregamento não estar uniformemente distribuído entre as cadeias moleculares. Quando uma carga é aplicada em uma peça plástica, certos segmentos da cadeia carregam uma quantidade desproporcional de carga, que pode ser suficiente para superar a resistência da ligação. O grau de não uniformidade na tensão é mais acentuado nos polímeros amorfos, enquanto que a limitada simetria nos polímeros cristalinos tende a distribuir a tensão de forma mais uniforme. Radicais livres são formados quando as ligações covalentes são rompidas, conseqüentemente a separação das cadeias pode ser detectada por meio experimental através de ressonância elétrica (ESR) e espectroscopia infravermelha, [17].

Em outros casos a fratura ocorre por desembaraçamento da cadeia, quando moléculas se separam. O desembaraçamento depende do tamanho da molécula e do grau de entrelaçamento. A maioria dos polímeros, como os metais, escoam em tensões elevadas. Enquanto os metais escoam através dos planos de escorregamento, os polímeros exibem o escoamento cisalhante ou o escoamento através das microcavidades.

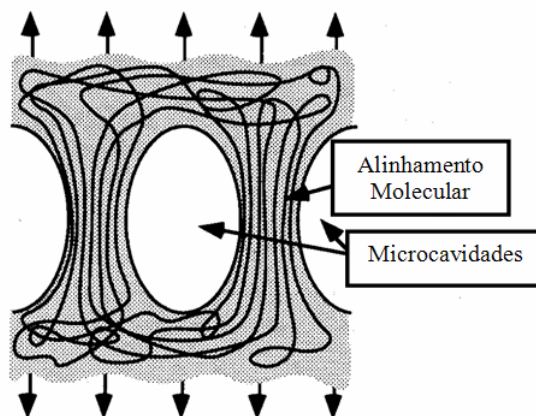
No escoamento cisalhante as moléculas escorregam umas em relação às outras quando submetidas a uma tensão cisalhante crítica. O escoamento cisalhante ocorre tanto pelo critério de máxima tensão de cisalhamento ou pela tensão de cisalhamento octahédrica.

$$\tau_{\max} = \tau_0 - \mu_s \sigma_m \text{ ou } \tau_{oct} = \tau_0 - \mu_s \sigma_m$$

Onde  $\sigma_m$  é a tensão hidrostática e  $\mu_s$  é a constante que caracteriza a sensibilidade do comportamento ao escoamento em  $\sigma_m$ . Quando  $\mu_s = 0$ , as equações anteriores podem ser reduzidas aos critérios de Tresca e Von Mises respectivamente.

Os polímeros vítreos submetidos à tensão geralmente escoam através das trincas, que é uma deformação altamente localizada que avança a cavitação e deformações da ordem de 100%.

No nível macroscópico, as trincas aparecem como uma região branqueada pela tensão, devido a um baixo índice de refração. A zona de cisalhamento geralmente se forma perpendicularmente a direção das tensões normais principais. A **Figura 2.10** ilustra esse mecanismo para polímeros homogêneos vítreos. Em suficientemente altas deformações, as cadeias moleculares formam pacotes alinhados chamados de fibras. Microcavidades se formam entre as fibras devido à incompatibilidade das deformações entre as fibras vizinhas.



**Figura 2.10:** Formação de trinca em polímero vítreo, [17].

A estrutura alinhada das fibras permite o suporte de altos níveis de tensão relativo às regiões amorfas não deformadas, porque as ligações covalentes são muito mais fortes e rígidas que as ligações secundárias. A fratura ocorre com a ruptura das fibras.

A fratura na zona cisalhamento geralmente se inicia a partir de uma inclusão inorgânica, que é envolvida no polímero. Existem alguns meios de neutralizar o efeito dos detritos e impurezas, como a adição de partículas para formar uma segunda fase mais macia.

Fratura e escoamento são mecanismos concorrentes, o comportamento dominante para o escoamento vai depender da estrutura molecular, estado de tensão e temperatura. Uma componente hidrostática de tensão grande no estado de tensões conduz para o cisalhamento, enquanto que para o escoamento favorece grandes desvios das componentes de tensão. Cada mecanismo de escoamento apresenta diferente dependência com a temperatura, portanto o mecanismo dominante pode mudar com a temperatura.

Quando uma trinca atinge o comprimento crítico, ela se propaga de forma catastrófica pela estrutura, mesmo com uma tensão atuante na região menor do que a tensão de escoamento do material. A mecânica da fratura estabelece as relações entre o comprimento da trinca, a resistência do material a propagação da trinca e a tensão em que a trinca se propaga rapidamente.

Historicamente vale citar os estudos desenvolvidos por Griffith no início do século passado que estabelecem estas relações através da abordagem do balanço de energia. A energia de deformação total liberada ( $U$ ) é comparada com a energia de separação superficial do material ( $\gamma$ ), onde  $\gamma$  é a propriedade mecânica relevante para a análise da fratura.

Atualmente, após os desenvolvimentos de Irwing, [17], a propriedade mecânica significativa para a análise do comportamento mecânico à fratura dos polímeros é a tenacidade à fratura ou fator de intensificação de tensões crítico ( $K_{IC}$ ).

## 2.9 Propriedades Mecânicas do Material Utilizado

O polímero utilizado na fabricação dos reservatórios da máquina é um polietileno linear de média densidade, copolímero de Buteno-1, produzido para moldagem rotacional. Esta resina é indicada à fabricação de tanques, brinquedos e barcos, e a tabela 1 [18] na página seguinte, apresenta as principais propriedades deste material. Os ensaios de tração foram realizados conforme a norma ASTM D638, e utilizou corpos de prova fabricados pelo processo de injeção.

Tendo em vista a variação das propriedades mecânicas em função do processo de fabricação, foram realizados ensaios de tração para o levantamento das propriedades válidas ao reservatório que é fabricado por rotomoldagem. Como descrito anteriormente, as propriedades finais do material variam também com os parâmetros utilizados na rotomoldagem, entre os quais se pode citar o tempo de cura e a velocidade de resfriamento, conforme já ilustrado através das figuras 2.4 e 2.5.

**Tabela 2.1:** Propriedades mecânicas do polietileno RA34-U3 - injetado, [18]

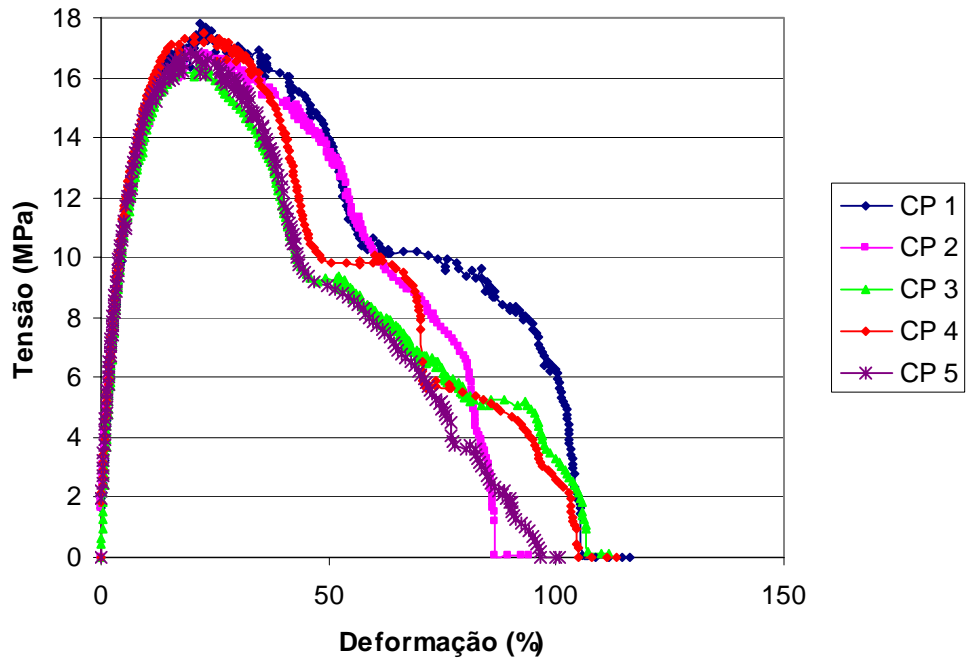
Propriedade	Método	Valor Médio	Unidade
Índice de Fluidez	D 1238	4,2	g/10min
Densidade	D 792	0,935	g/cm <sup>3</sup>
Limite de escoamento	D638 (*)	12,4	Mpa
Ponto de Amolecimento Vicat	D 1525	116	°C
Limite de Resistência Mecânica	D 638 (*)	17	Mpa
Limite de Ruptura (não disponível)			
Alongamento na Ruptura	D 638 (*)	944	%
Resistência ao Impacto Izod	D 256	180	J/m
Módulo de Elasticidade	D638	233	MPa
Módulo de Poison	D638	0,4	

(\*) velocidade de teste = 50mm/min

Desta forma, cinco corpos de prova foram usinados com material removido das laterais de um reservatório, processado com parâmetros estabilizados de fabricação.

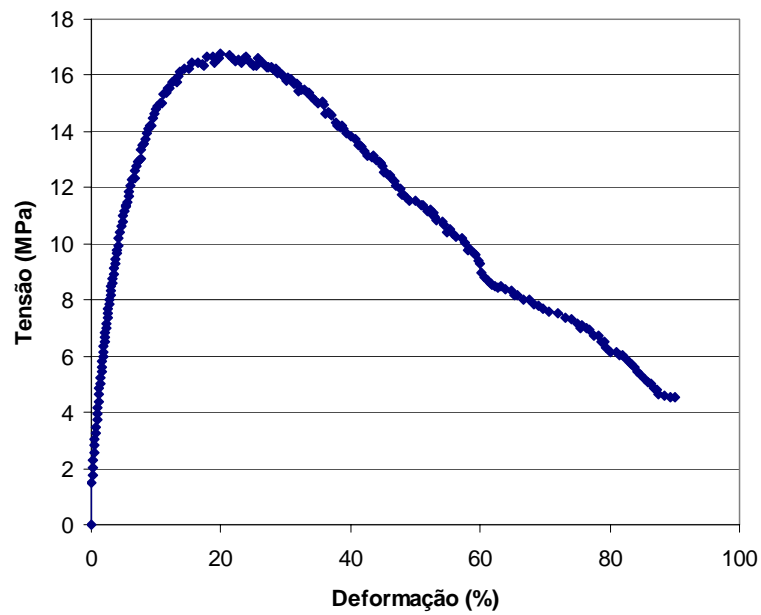
As dimensões e características geométricas do corpo de prova seguiram conforme o “Tipo I” da norma ASTM D638. Foi empregada a velocidade de ensaio de 50mm/min, o que permite estabelecer uma comparação direta com as propriedades mecânicas da tabela 2.1.

Na **Figura 2.11** as curvas dos ensaios para os cinco corpos de prova são apresentadas.



**Figura 2.11:** Curvas tensão/deformação dos corpos de prova ensaiados.

A **Figura 2.12** apresenta a curva média dos ensaios tensão/deformação, de onde foram extraídas as propriedades apresentadas na tabela 2.2.



**Figura 2.12:** Curva tensão-deformação média dos corpos de prova ensaiados.

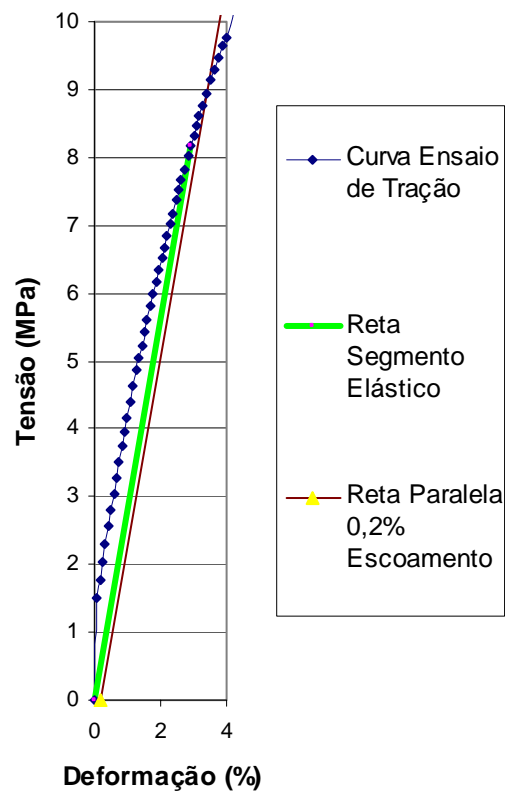
**Tabela 2.2:** Propriedades mecânicas do polietileno RA34-U3 rotomoldado.

Propriedade	Método	Valor Médio	Unidade
Limite de Escoamento	D638	9,0	Mpa
Limite de Resistência Mecânica	D 638	16,5	Mpa
Limite de Ruptura	D 638	4,51	Mpa
Alongamento na Ruptura	D 638	90	%
Módulo de Elasticidade	D638	279	MPa

O limite de escoamento foi levantado admitindo-se 0,2% de deformação permanente. A

**Figura 2.13** apresenta o trecho elástico da curva tensão-deformação média dos corpos de prova ensaiados.





**Figura 2.13:** Segmento elástico da curva do ensaio de tração.

Os resultados apresentados na Tabela 2.2 são muito próximos aos resultados obtidos em referência bibliográfica e apresentados na Tabela 2.1, motivo pelo qual serão utilizados os resultados médios apresentados na Tabela 2.2.

## CAPÍTULO III

### PROCEDIMENTOS DE PROJETO

#### 3.1 Generalidades

O Processo de desenvolvimento de produtos pode ser definido como um conjunto de atividades que envolvem todas as áreas da empresa, e que visa à transformação de necessidades de mercado em produtos ou serviços economicamente viáveis. O processo de desenvolvimento de produtos engloba desde o projeto do produto, que é a fase principal, até a avaliação do produto pelo consumidor, passando pela fabricação, [19].

O projeto é um empreendimento não repetitivo, caracterizado por uma seqüência clara e lógica de eventos, com início, meio e fim, que se destina a atingir um objetivo claro e definido, sendo conduzido por pessoas dentro de parâmetros predefinidos de tempo, custo, recursos envolvidos e qualidade, [20].

Os projetos envolvem todos os níveis da organização. Eles podem envolver uma quantidade pequena de pessoas, ou milhares delas. Podem levar menos de um dia ou vários anos. Os projetos, muitas vezes, ultrapassam as fronteiras da organização, atingindo fornecedores, clientes, parceiros e governo, e na maioria dos casos ele é parte do plano estratégico da companhia.

As principais características do projeto são: a temporariedade, a individualidade do produto ou serviço a ser desenvolvido, a complexidade e a incerteza. A temporariedade significa que todo projeto possui um início e um fim definidos, ou seja, é um evento com duração finita, determinada em seu objetivo. Como o produto de cada projeto é único, suas características precisam ser elaboradas de maneira progressiva de modo a garantirem as especificações do produto ou serviço a ser desenvolvido, daí defini-se a individualidade como característica de projeto, [20].

Todo projeto necessita ter estabelecidos valores para prazos, custos, pessoal, material e equipamentos envolvidos, bem como a qualidade desejada para o projeto. É impossível estabelecer, previamente, com total precisão, esses parâmetros. Todos eles são claramente identificados e quantificados no decorrer do plano do projeto. Entretanto, os parâmetros iniciais vão atuar como referências para o projeto e sua avaliação.

Todo projeto pode ser subdividido em determinadas fases de desenvolvimento. Esse conjunto de fases é conhecido como ciclo de vida. O ciclo de vida permite que seja avaliada uma série de similaridades que podem ser encontradas em todos os projetos, independentemente de seu contexto, aplicabilidade ou área de atuação.

O ciclo de vida pode ser dividido em um conjunto de fases, normalmente fixas para todos os tipos de projeto, contendo uma série de passos principais do processo de contextualizar, desenhar, desenvolver e colocar em operação uma determinada necessidade do projeto.

Conhecer as fases do ciclo de vida proporciona uma série de benefícios para qualquer tipo de projeto. Dentre eles, podem ser destacados os seguintes, [20]:

- A correta análise do ciclo de vida determina o que foi, ou não, feito pelo projeto;
- O ciclo de vida avalia como o projeto está progredindo até o momento;
- O ciclo de vida permite que seja indicado qual o ponto exato em que o projeto se encontra no momento.

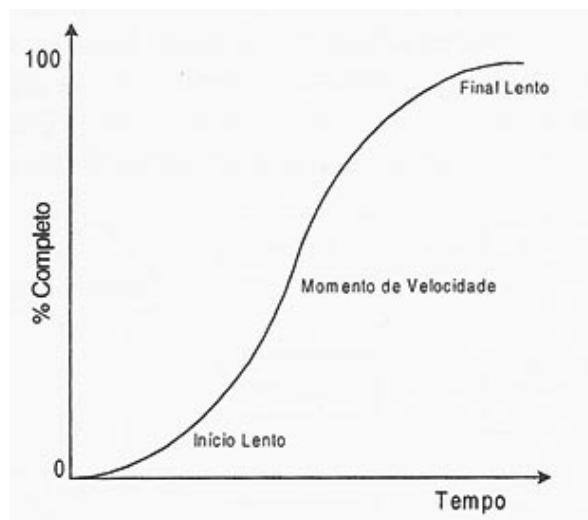
Ao longo do ciclo de vida, diversas considerações podem ser feitas, principalmente:

- As características do projeto tendem a mudar com a conclusão de cada fase do projeto;
- A incerteza relativa aos prazos e custos tende a diminuir com o término de cada fase.

Com relação à velocidade de desenvolvimento, o ciclo de vida dos projetos pode ser caracterizado, na maioria das vezes, por um início lento seguido de um progresso acelerado até atingir um pico e logo em seguida, uma desaceleração até atingir o término. O gráfico da **Figura 3.1** na próxima página ilustra esta relação.

Outra consideração a ser analisada no ciclo de vida de um projeto é o nível de esforço. O nível de esforço destinado ao projeto inicia-se em praticamente zero e vai crescendo até atingir um máximo e, logo após esse ponto, reduz-se bruscamente até atingir o valor zero, representante do término do projeto. Entende-se por esforço a quantidade de pessoas envolvidas no projeto, o dispêndio de trabalho e dinheiro com o projeto, as preocupações, as complicações, as horas extras, etc.

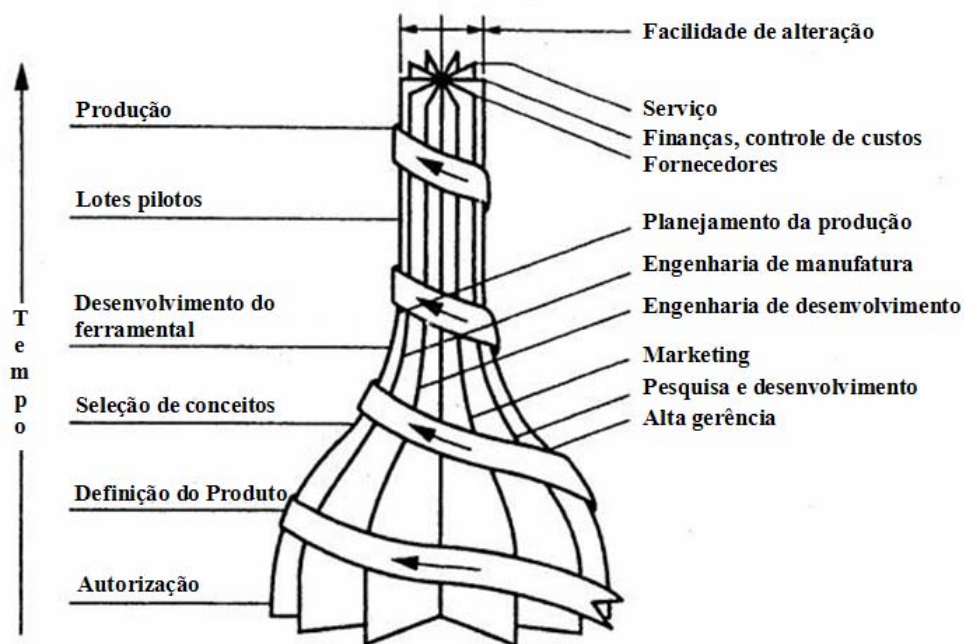
O custo de promover mudanças no projeto é pequeno nas fases iniciais, e cresce exponencialmente com o progresso do projeto, [20].



**Figura 3.1:** Ciclo de vida do projeto segundo a velocidade de desenvolvimento, [20].

Todos os projetos têm uma característica básica: não se desenvolvem linearmente, com cada etapa sendo completamente detalhada antes de se passar para a seguinte. O desenvolvimento de um projeto é interativo, pois cada item depende de outros para que o sistema como um

todo funcione harmonicamente. Assim, uma imagem que define bem o processo de projeto é o de uma espiral, em que na primeira volta os itens são definidos de forma grosseira, aproximada; essa definição vai ficando mais precisa nas voltas seguintes, até convergir para a configuração final do sistema (projeto). A **Figura 3.2** apresenta uma espiral de projeto. Observe que não é necessário passar por todos os itens de cada volta, [19].



**Figura 3.2:** Espiral de desenvolvimento de produto.

Durante o projeto, deve ser considerado todo o ciclo de produção e consumo, embora com prioridades diferenciadas, de acordo com o tipo de produto.

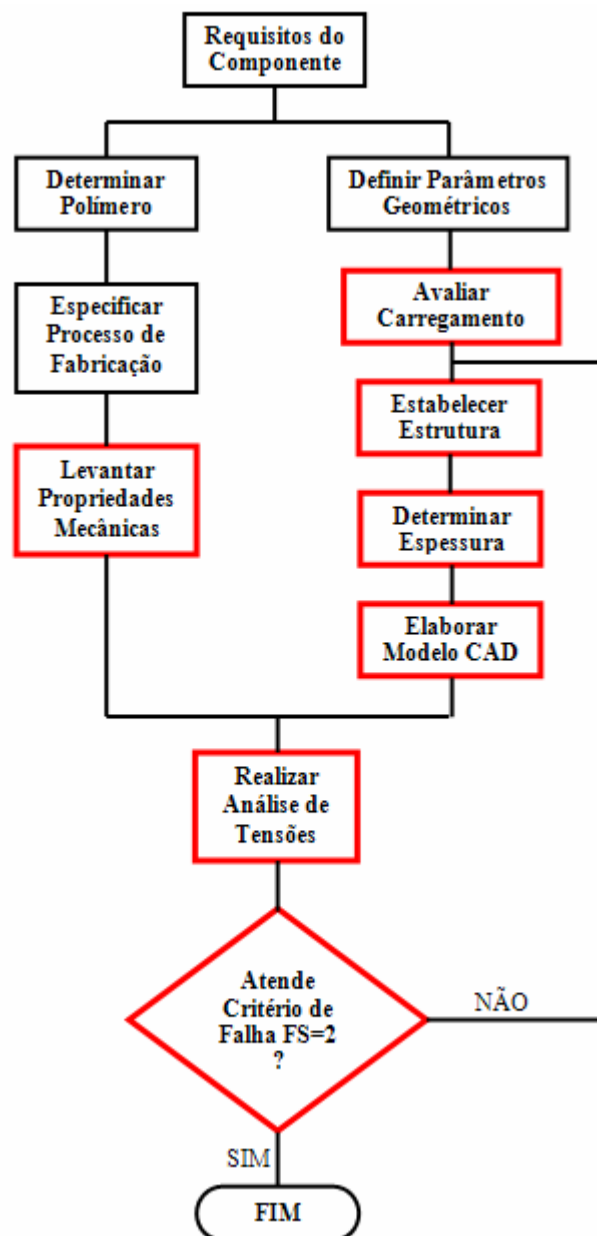
O projeto da máquina lavadora foi dividido nas seguintes fases:

- 1ª FASE: Estudo de Viabilidade
- 2ª FASE: Projeto Básico
- 3ª FASE: Projeto Executivo
- 4ª FASE: Planejamento da Produção/Execução
- 5ª FASE: Planejamento da Disponibilização ao Cliente

- 6ª FASE: Planejamento do Consumo ou Utilização do Produto

O presente trabalho desenvolve o procedimento aplicado ao projeto estrutural do reservatório de recolhimento, que é realizado dentro do projeto básico do produto.

O diagrama da **Figura 3.3** apresenta as atividades do projeto do reservatório em questão, e os quadros em vermelho são abordados no presente trabalho.



**Figura 3.3:** Fluxograma das atividades do projeto estrutural.

O projeto estrutural do reservatório pode ser desenvolvido segundo as seguintes análises: visco-elasto-plástica, fratura e tensão-deformação.

### 3.2 Análise Visco-Elasto-Plástica

O tempo necessário para o ajuste das tensões é denominado de tempo de relaxação. O tempo de relaxação é definido matematicamente como o tempo necessário para reduzir as tensões de “1/e” do seu valor original. Essa é uma definição conveniente, pois sob condições de deformações constantes, [21],

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{\sigma}{\lambda} \text{ ou } \sigma = \sigma_0 e^{-t/\lambda}$$

Como a relaxação de tensão depende do movimento dos átomos ou moléculas, verificamos que o recíproco do tempo de relaxação varia com a temperatura.

Se as deformações e tensões são pequenas e a dependência com o tempo é baixa, os ensaios Fluência e Relaxação são essencialmente o inverso um do outro. No entanto, em condições de tensão e deslocamento maiores, a conversão dos resultados dos ensaios requer cálculos e métodos mais complexos, [15].

Uma força aplicada em um instante  $t=0$  causa deformações que resultam dos deslocamentos das cadeias moleculares e das distorções das ligações. A energia de deformação armazenada é gradualmente distribuída através da rotação de segmentos da cadeia molecular, produzindo deformações adicionais até um novo equilíbrio entre as forças externas e as forças intermoleculares, [22].

Conforme pôde ser visto no capítulo II, se a temperatura aumenta, a expansão interna causa a redução dos módulos iniciais seguida de um acentuado declínio destes com o tempo.

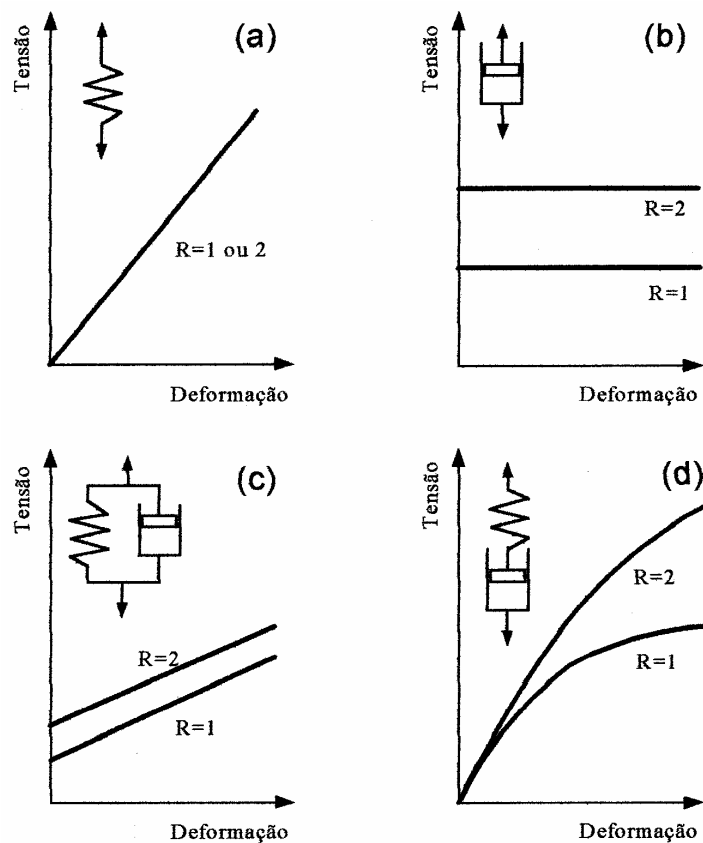
Uma forma conveniente de quantificar a redução do módulo com o tempo e a temperatura é através de analogias mecânicas utilizando molas e amortecedores. O termo visco-elasticidade

deriva destas representações, onde as molas simulam a componente elástica e o amortecedor o comportamento viscoso.

O modelo de Voigt consiste de uma mola e um amortecedor ligado em paralelo e é utilizado para descrever a deformação dependente com o tempo resultante de carga ou tensão constante. Neste modelo a deformação é igual para os dois elementos e a tensão total é a soma da tensão da mola e do amortecedor, assim:  $\sigma = \sigma_E + \sigma_D$

Onde  $\sigma_E = \varepsilon_E E$  corresponde a tensão atuante na mola e  $\sigma_D = \eta(d\varepsilon/dt)$  é a tensão no amortecedor. Sendo  $d\varepsilon/dt$  a taxa de deformação e  $\eta$  a viscosidade do amortecedor.

O gráfico (c) da **Figura 3.4**, [15], representa esse modelo.



**Figura 3.4:** Modelos empregados para simular o comportamento mecânico de polímeros e as respectivas curvas tensão-deformação. (R - taxa de deformação utilizada no ensaio), [15].



O modelo de Maxwell consiste de um conjunto mola e amortecedor conectados em série e representa a resposta visco-elástica a uma deformação constante, **Figura 3.4** (a). A tensão atuante na mola e no amortecedor é igual, porém a deformação total corresponde à soma das deformações da mola e do amortecedor. Em condições de ensaio de relaxação, com uma deformação  $\varepsilon$  definida enquanto a tensão  $\sigma$  é obtida em função do tempo, a deformação da mola é compensada em igual quantidade pela deformação no amortecedor, porém o total é zero assim:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} = 0$$

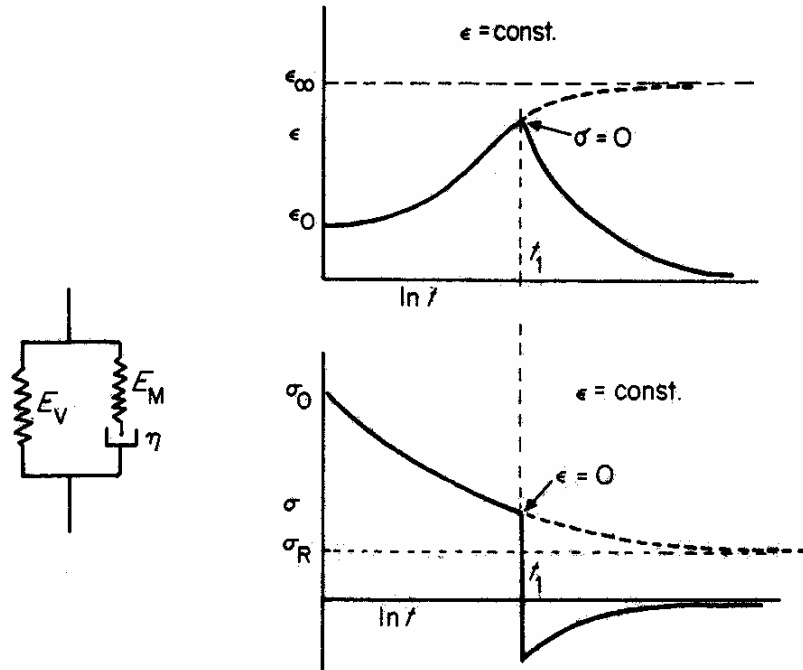
O gráfico (d) da **Figura 3.4** mostra esse modelo, e nele podemos observar que a declividade inicial corresponde a deformação da mola que é dado pelo seu módulo de elasticidade, que é independente da taxa de deformação. Com o aumento da deformação, a declividade da curva decresce e sua magnitude depende da velocidade do ensaio quando o cilindro começa a relaxar parte das tensões. Eventualmente a mola pára de deformar e todo o deslocamento decorre do movimento do amortecedor.

Os modelos descritos anteriormente não podem ser usados indiscriminadamente para representar os ensaios de Fluência e Relaxação de tensão para descrever o comportamento dos polímeros, [22].

Por exemplo, o modelo de Voigt não pode ser aplicado para exibir a relaxação de tensão em condições de deformação constante, onde o resultado  $\sigma = E_V \varepsilon_0 = \sigma_0$  não permite essa análise. O modelo de Maxwell também tem restrições na representação do retorno da deformação quando a tensão é removida, e a tensão é zero em  $t_1$ , a deformação no

amortecedor permanece com o valor de:  $\varepsilon_D = \frac{\sigma}{\eta} t_1$ .

O comportamento dos polímeros pode ser melhor representado por um modelo de três elementos, como na **Figura 3.5** [22].



**Figura 3.5:** Modelo sólido linear padrão, [22].

O modelo sólido linear padrão (SLS) agrega parcelas dos modelos de Voigt e Maxwell. Neste modelo, quando uma tensão constante é aplicada, a deformação inicial é representada pela mola única com módulo de elasticidade  $E_1$ . As deformações nos instantes seguintes são incrementadas pela ligação em paralelo, com as parcelas  $E_2$  e  $\eta_2$  e pela viscosidade  $\eta_3$  do terceiro amortecedor. A deformação total desse modelo é a soma da elongação individual das três partes, assim:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-t/t_R}) + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t$$

Onde  $\sigma_0$  é a tensão aplicada e o tempo de retardação  $t_R$  é definido por:

$$t_R = \frac{\eta_2}{E_2}$$

Em um teste de retorno após a retirada da carga no tempo  $t_1$ , a fluência é retornada exceto a parcela  $\eta_3$  correspondente ao amortecedor mais próximo à carga.

No instante que a carga é removida, ocorre a redução da deformação do modelo igual a  $\frac{\sigma_0}{E_1}$

. A equação para o retorno da fluência é:

$$\varepsilon = \varepsilon_2 e^{-\frac{(t-t_1)}{t_R}} + \frac{\sigma_0 t_1}{\eta_3}$$

$$\text{Onde } \varepsilon_2 = \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-\frac{t_1}{t_R}})$$

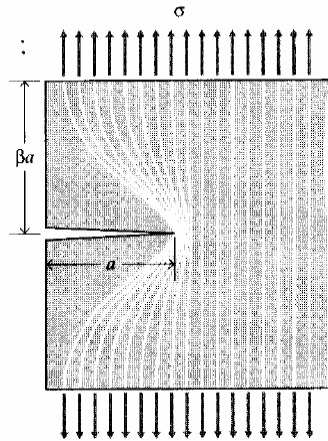
O presente projeto estrutural não realizou a análise visco-elasto-plástica.

### 3.3 Análise à Fratura

A energia de deformação total liberada  $U$ , representa a energia por unidade de comprimento da trinca:

$$U = -\frac{\sigma^2}{2E} \pi a^2$$

A **Figura 3.6** ilustra uma trinca de comprimento “ $a$ ” em um componente submetido a uma tensão “ $\sigma$ ”.



**Figura 3.6:** Idealização da região descarregada nas proximidades da trinca, [23].

Esta energia é liberada pelo crescimento da trinca, porém para formá-la, as ligações precisam ser quebradas e a energia necessária é absorvida pelo material. A energia  $S$  associada a uma trinca de comprimento “ $a$ ”, é então:  $S = 2\gamma a$

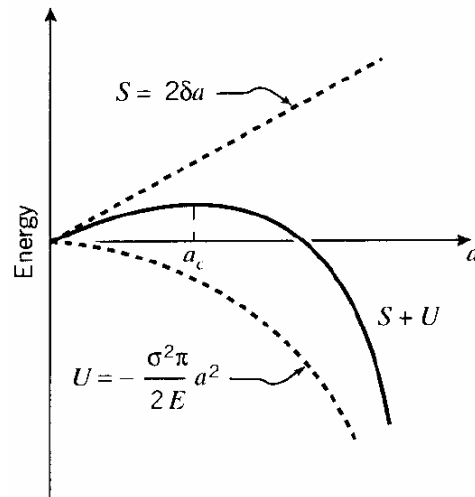
Onde  $\gamma$  é a energia de superfície em Joule por  $m^2$ .

Como pode ser observado na **Figura 3.7** a energia total associada à trinca é a soma da parcela positiva correspondente a energia absorvida para formar as novas superfícies mais a parcela negativa referente a energia de deformação liberada.

Até o ponto onde  $a=a_c$ , a trinca somente aumentará de tamanho se houver aumento da tensão aplicada. Após esse ponto, o crescimento da trinca é espontâneo e catastrófico.

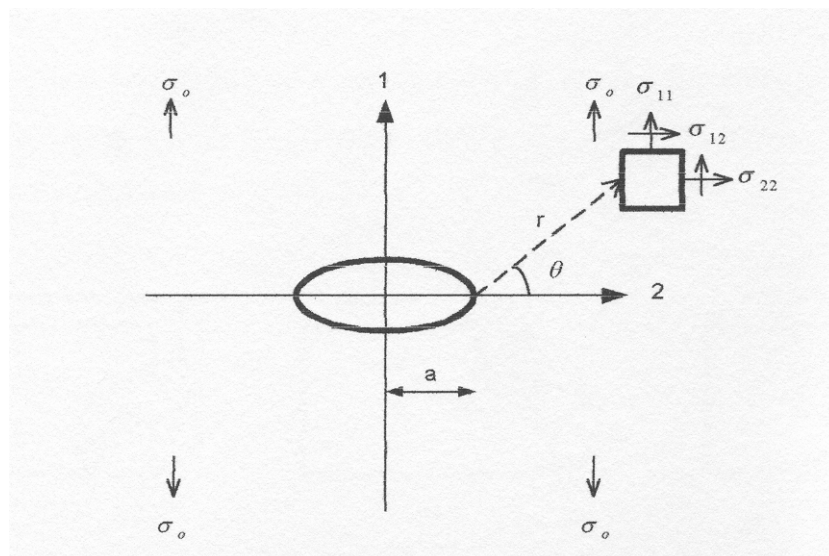
A tensão na qual a fratura rápida é eminente pode ser obtida pela relação de Griffith:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}}$$



**Figura 3.7:** Balanço da energia de fratura, [23].

Enquanto a abordagem por balanço de energia fornece uma grande compreensão do processo de fratura, um método alternativo de abordar a análise de fratura é através da utilização do Fator de Intensificação de tensões. Esta abordagem foi desenvolvida a partir dos trabalhos teóricos de Westergaard em 1939, que apresentou soluções para certas funções de tensão considerando a presença de uma trinca numa lâmina infinita, como a representada na **Figura 3.8**.



**Figura 3.8:** Trinca aguda em lâmina infinita tensionada uniformemente, [17].

Para soluções fechadas na ponta da trinca a solução é dada pela equação:

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 \sqrt{\frac{a}{2r}} f_{ij}(\theta)$$

Onde:

$\sigma_{ij}$  - componente do tensor de tensões no ponto (MPa);

$\sigma_0$  - tensão aplicada (MPa);

$a$  - semi-comprimento da trinca (m);

$r$  e  $\theta$  - coordenadas polares do ponto;

$f_{ij}$  - função conhecida de  $\theta$ ;

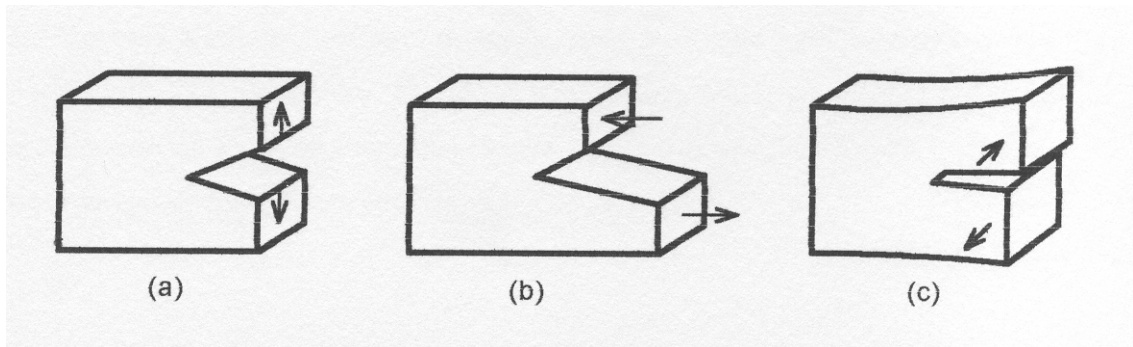
Irwin em 1964 modificou essa solução como:

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$$

Onde K foi definido como o Fator de Intensificação de Tensões, sendo estabelecido para a lâmina infinita como sendo igual a  $K = \sigma_0 \sqrt{\pi a}$ .

O fator de intensidade de tensões K, refere-se a magnitude das intensidades de tensões locais na trinca em termos de carregamento aplicado e geometria da estrutura onde é localizada a trinca.

Uma trinca em um sólido pode assumir três configurações diferentes, as quais são apresentadas na **Figura 3.9**.



**Figura 3.9:** Diferentes modos de carregamentos que originam trincas em sólidos, [17].

O modo I apresentado em (a) é definido por um esforço normal e de abertura da trinca, os modos II e III respectivamente apresentados em (b) e (c) são modos cisalhantes. O modo I, de abertura a tração, é tecnicamente o mais importante. Para este modo as tensões na ponta da trinca podem-se desenvolver a partir das equações:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{22} \end{bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\pi}{2} \begin{bmatrix} 1 + \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \\ \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \\ 1 - \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \end{bmatrix}$$

$\sigma_{33} = 0$ , para o estado plano de tensões;

$\sigma_{33} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22})$ , para o estado plano de deformações;

$\sigma_{23} = \sigma_{13} = 0$

Onde  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  e  $\sigma_{33}$  são as tensões principais (MPa);

$K_I$  - fator de intensificação das tensões para o modo I (MPam<sup>1/2</sup>);

$r$  e  $\theta$  - coordenadas polares do ponto;

$\nu$  - coeficiente de Poisson

Para o plano onde  $\theta=0$  a tensão de cisalhamento é zero e as tensões  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  e  $\sigma_{33}$  são as tensões principais.

Analisando a equação anterior fica claro que quando o raio tende à zero, então a tensão  $\sigma_{ij}$  tende ao infinito, portanto a tensão não é suficiente para o estabelecimento de um critério local de fratura. Devido a isso, Irwing em 1964, postulou o critério de fratura baseado no fator de intensificação de tensões da seguinte forma, definindo unicamente o campo de tensões ao redor da trinca, com:

$$K_I \geq K_{IC}$$

Onde  $K_{IC}$  é a tenacidade à fratura ou valor crítico do fator de intensificação de tensões para o modo I ( $\text{MPa m}^{1/2}$ ).

No projeto do reservatório não foi realizada a análise a fratura.

### **3.4 Análise Tensão-Deformação**

O critério da máxima energia de distorção, também chamado de critério de Von Mises, devido ao especialista em matemática aplicada Richard Von Mises, baseia-se na determinação da energia de distorção de um material, ou seja, da energia relacionada com mudanças na forma deste material.

Por esse critério, um componente estrutural estará em condições de segurança enquanto o maior valor de energia em distorção por unidade de volume necessária para provocar o escoamento no corpo de prova de mesmo material submetido a ensaio de tração [24].

A energia de distorção por unidade de volume em um material isotrópico em estado plano de tensões é:



$$u_d = \frac{1}{6G} (\sigma_a^2 - \sigma_a \sigma_b + \sigma_b^2)$$

Onde  $\sigma_a$  e  $\sigma_b$  são as tensões principais e  $G$  o módulo de elasticidade transversal. Quando um corpo de prova em ensaio de tração começa a escoar tem-se  $\sigma_a = \sigma_Y$  e  $\sigma_b = 0$ , sendo

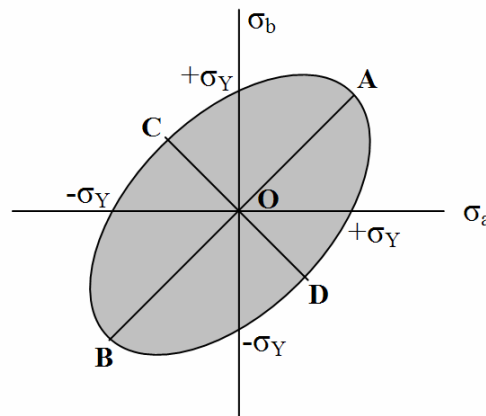
$(u_d)_Y = \frac{\sigma_Y^2}{6G}$  o critério de máxima energia de distorção indica que o elemento estrutural está

seguro quando:

$$\sigma_a^2 - \sigma_a \sigma_b + \sigma_b^2 < \sigma_Y^2$$

Qualquer estado de tensões dado será representado por um ponto de coordenadas  $\sigma_a$  e  $\sigma_b$ , que são as tensões principais desse estado de tensões. Se o ponto cair dentro da área delimitada pela elipse  $\sigma_a^2 - \sigma_a \sigma_b + \sigma_b^2 = \sigma_Y^2$ , o elemento estrutural está em condições de segurança. A **Figura 3.10** apresenta a elipse que define o critério de Von Mises.

O eixo maior da elipse da figura anterior é definido pelos pontos  $A(\sigma_a = \sigma_b = \sigma_Y)$  e  $B(\sigma_a = \sigma_b = -\sigma_Y)$  e o eixo menor se estende de  $C(\sigma_a = -\sigma_b = -0,577\sigma_Y)$  até  $D(\sigma_a = -\sigma_b = 0,577\sigma_Y)$ .



**Figura 3.10:** Critério de Von Mises, [24].

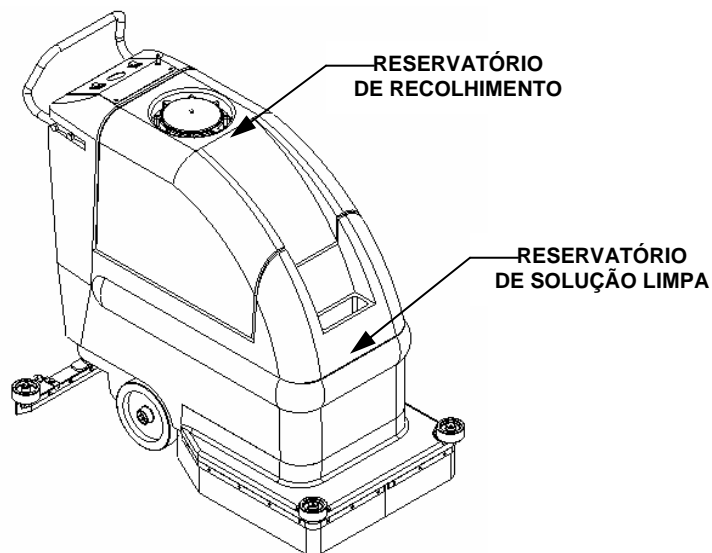
O critério de Von Mises será utilizado na seleção da geometria mais adequada ao reservatório.

### 3.5 Características do Reservatório

Durante a definição do produto, entre outras características, foi especificado que o reservatório deveria possuir capacidade de armazenamento de líquidos compatível à operação contínua da máquina durante uma hora. Dessa forma, foi estabelecido que a capacidade útil de armazenamento do reservatório deveria ser de 50 litros.

Foi especificado o limite de 450mm para a largura total dos reservatórios, isso fundamentado na necessidade de operação da máquina na limpeza da área entre caixas de supermercados.

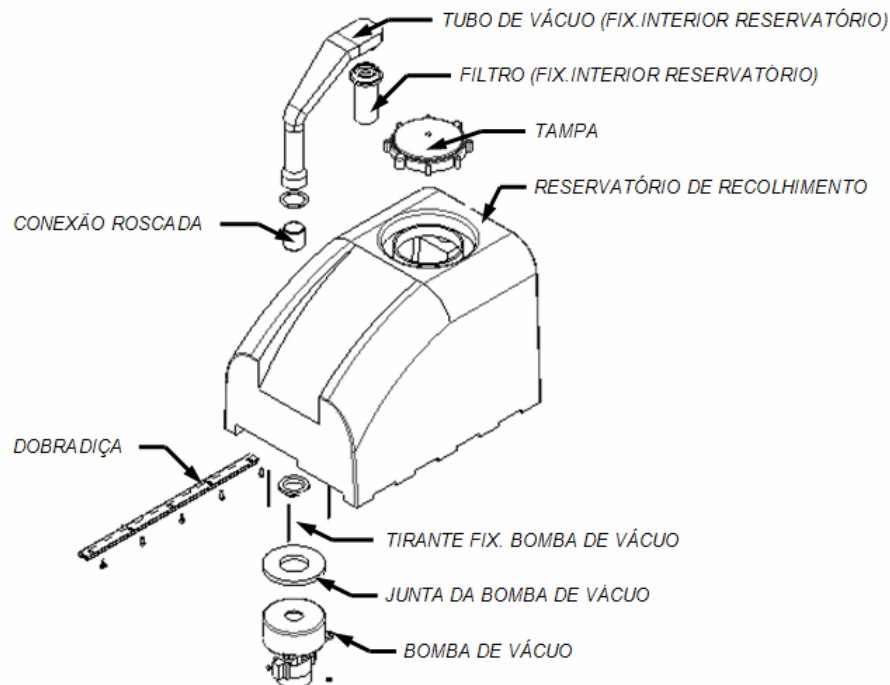
A integração da interpretação das definições do produto, da observação direcionada de modelos de outros fabricantes, do levantamento dos componentes necessários e do estudo de viabilidade, permitiu o desenvolvimento do design conforme apresentado na **Figura 3.11**.



**Figura 3.11:** Ilustração da lavadora de pisos no projeto básico.

O Apêndice A apresenta o desenho do reservatório de recolhimento. A **Figura 3.12** ilustra o reservatório de recolhimento desmontado junto aos principais componentes que são acoplados nele.

A bomba de vácuo, cuja ficha técnica está exposta no Apêndice B, produz uma depressão máxima no interior do reservatório de  $2,6 \times 10^{-3}$  MPa, pois está conectada ao reservatório através de um orifício de 38,1mm (1,5”). O valor da pressão produzida pela bomba de vácuo para o orifício de 38,1mm, não é o valor atuante nas paredes do reservatório durante o funcionamento normal da máquina, ele pode ser alcançado somente com o fechamento completo de todas as aberturas do componente, inclusive a que permite a entrada do líquido do piso.



**Figura 3.12:** Conjunto do reservatório de recolhimento desmontado.

### 3.5 Análise Preliminar

A definição da espessura das paredes do reservatório foi realizada através da observação de outros componentes submetidos a carregamento semelhante e de dimensões próximas as do componente em questão.

Com a finalidade de calcular os valores máximos da tensão e do deslocamento no reservatório para a espessura, material e carregamento selecionados, admitiram-se algumas simplificações na forma e na geometria do componente para a utilização de formulações conhecidas.

A primeira simplificação considera o reservatório como um cilindro com 400mm de diâmetro, valor aproximado da largura média do componente, 7mm de espessura de parede. As tensões principais e o deslocamento máximo podem ser calculados pelas equações, [25]:

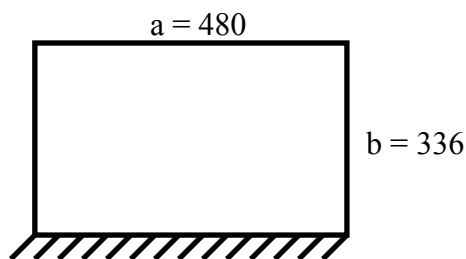
$$\sigma_1 = \frac{qR}{t}; \quad \sigma_2 = \frac{qR}{2t} \quad \text{e}$$

$$\Delta R = \frac{qR^2}{Et} \left(1 - \frac{\nu}{2}\right)$$

Admitindo-se o módulo de elasticidade,  $E = 279\text{MPa}$ , o raio  $R=200\text{mm}$  e a carga,  $q = -2,6 \times 10^3\text{MPa}$ , obtém-se:

$$\sigma_1 = -0,074\text{MPa}; \quad \sigma_2 = -0,037\text{MPa} \quad \text{e} \quad \Delta R = -5,32 \times 10^{-5}\text{mm}.$$

A segunda simplificação calcula os valores máximos da tensão e do deslocamento na superfície lateral do reservatório, considerando que a mesma consiste de uma chapa retangular com três extremidades simplesmente apoiadas e uma extremidade fixa, [25], conforme a **Figura 3.13**. As dimensões da chapa correspondem às medidas aproximadas de um retângulo projetado na superfície lateral do reservatório.



**Figura 3.13:** Ilustração da chapa com as dimensões da lateral do reservatório.

A espessura da placa é considerada uniforme e o material homogêneo, com espessura menor que  $\frac{1}{4}$  da menor dimensão transversal. A deflexão máxima deve ser menor que a metade da espessura.

A relação  $\frac{a}{b} = 1,43$  permite obter os valores aproximados de  $\alpha=0,046$  e  $\beta=0,66$ .

As equações:

$\sigma = \frac{\beta qb^2}{t^2}$  e  $y = \frac{-\alpha qb^4}{Et^3}$  permitem o cálculo da máxima tensão normal e da máxima deflexão

atuante na chapa.

Calculando-se para os valores de espessura, módulo de elasticidade e carga anteriores, obtém-se:

$$\sigma = -3,95\text{MPa e } y = 0,141\text{mm.}$$

Por critério de projeto, assume-se que:

$$\sigma_{eq} \leq \sigma_{adm}$$

onde

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{esc}}{FS}.$$

Onde:  $\sigma_{eq}$  é a tensão equivalente;  $\sigma_{adm}$  é a tensão admissível,  $\sigma_{esc}$  é a tensão de escoamento do material e  $FS$  o fator de segurança.

Admitindo-se  $FS=2,0$  e a tensão equivalente igual à tensão máxima calculada para a chapa, verifica-se que as condições consideradas na análise preliminar atendem ao critério de projeto.

A análise seguiu com a construção de um molde para a fabricação de amostras do reservatório. A **Figura 3.14** apresenta a amostra do reservatório de recolhimento neste estágio.



**Figura 3.14:** Foto do reservatório de recolhimento 1.

Um protótipo do reservatório foi montado e teste prático foi aplicado para a aferição dos deslocamentos atuantes no componente.

O teste revelou deslocamentos considerados excessivos nas laterais do reservatório de recolhimento, aproximadamente 17mm nos centros das superfícies laterais da peça.

Uma vez que o reservatório de recolhimento encontra-se apoiado e limitado nas extremidades pelo espaço localizado no reservatório de solução de limpeza, conforme pode ser visto pela **Figura 3.11**, as alterações geométricas estão restritas às superfícies laterais da peça.

As alternativas identificadas para reduzir o deslocamento apresentado nas superfícies laterais foram: incluir componentes estruturais, tal como armações metálicas montadas no interior do reservatório depois da rotomoldagem, ou a alteração da geometria dessas áreas com a inclusão de nervuras ou rebaixos.

A primeira alternativa foi testada através da montagem de um novo protótipo utilizando um modelo de armação metálica para impedir o deslocamento das superfícies laterais do reservatório. As seguintes desvantagens foram identificadas:

- Dificuldade na montagem da armação no interior do reservatório;
- O contato permanente da armação metálica com o líquido;
- A dificuldade de acesso para limpeza do filtro do reservatório;

- Custo.

Diante das restrições impostas, a solução envolve alterações localizadas somente nas laterais do reservatório, ou seja, é necessária a inclusão de nervuras, ressaltos ou variações de seção para reduzir o deslocamento lateral considerado excessivo.

Considerando que a linha de fechamento do molde está localizada no fim do raio em torno de todo contorno inferior do reservatório, é razoável admitir que a inclusão de nervuras ou rebaixos nas laterais da peça, tem que ser dispostas perpendicularmente à linha de fechamento do molde. Desta forma, as laterais do molde ficariam livres da construção de “gavetas”, que aumentam a complexidade de execução da ferramenta e a quantidade de marcas de linhas de fechamento na peça moldada, especialmente em áreas de grande destaque no produto.

Serão propostos diferentes modelos de reservatório envolvendo alterações limitadas às superfícies laterais do componente. A análise das tensões e deformações atuantes em cada modelo será realizada através do método dos elementos finitos até a identificação de uma geometria que satisfaça o critério de projeto, admitindo-se como tensão equivalente, o máximo valor dos resultados nodais da tensão de Von Mises.

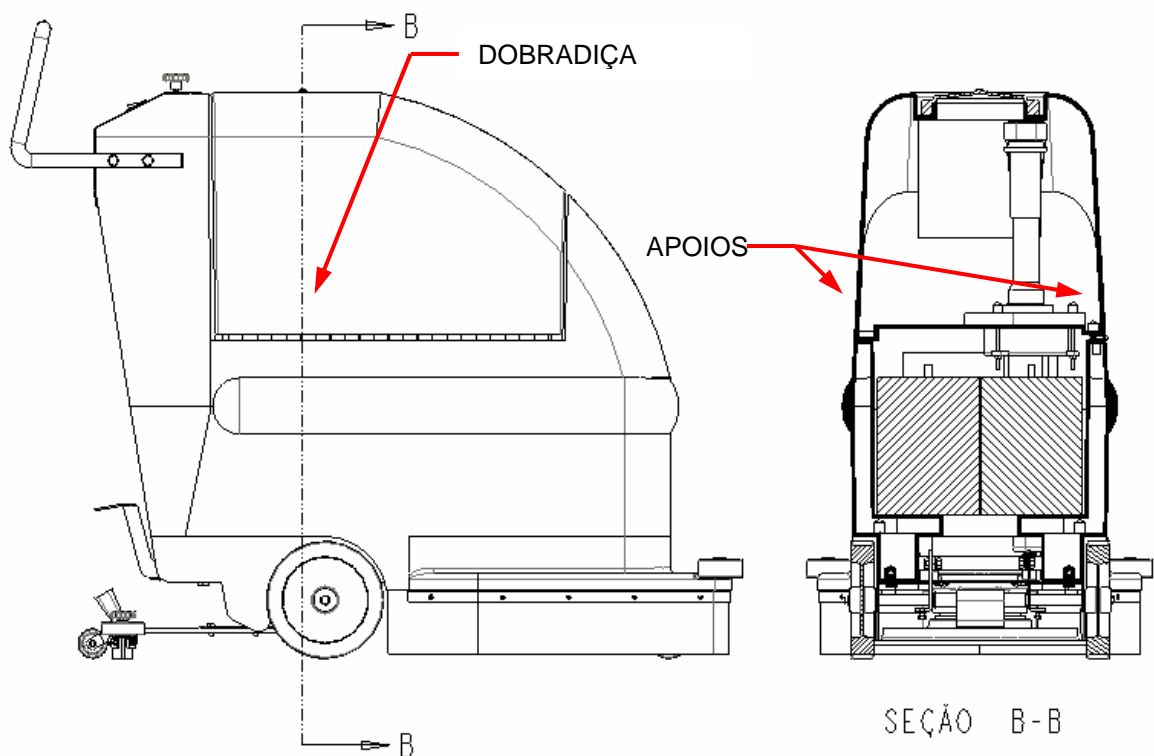
## CAPÍTULO IV

### ANÁLISE NUMÉRICO-COMPUTACIONAL

#### 4.1 Representação do Modelo Físico

O problema estrutural citado no capítulo III, onde a deformação da parede lateral do reservatório de recolhimento foi considerada excessiva, será aqui enfocado.

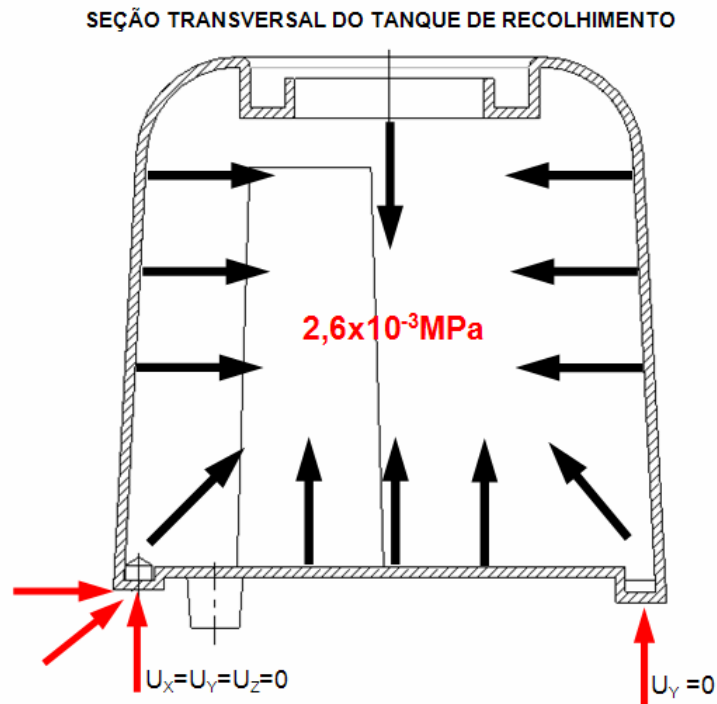
O reservatório de recolhimento encontra-se apoiado sobre o reservatório de solução através das suas regiões laterais inferiores. Em uma das extremidades o reservatório é fixado por uma dobradiça e na outra ele fica apoiado sobre a lateral do reservatório de solução. A **Figura 4.1** apresenta a condição de apoio do reservatório.



**Figura 4.1:** Ilustração da condição de apoio do reservatório de recolhimento.



A **Figura 4.2** apresenta o carregamento e os vínculos considerados nas análises. Para o carregamento, conforme descrito anteriormente, admitiu-se que a pressão é igual e constante em todo o volume interno do reservatório.



**Figura 4.2:** Ilustração do carregamento e vínculos.

Conforme indica a **Figura 4.2**, a área do reservatório correspondente à fixação da dobradiça é impedida de movimentar nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , enquanto que as áreas de apoio na extremidade oposta, têm restrição ao movimento apenas na direção  $Y$ .

#### 4.2 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos é um método aproximado de cálculo, utilizado para resolver problemas físicos em engenharia, encontrando grande aplicação no ramo das análises de estruturas, transferência de calor e mecânica dos fluidos.

A estrutura, o componente mecânico ou, de forma geral, o corpo contínuo é subdividido em um número finito de partes (os elementos), conectados entre si por intermédio de pontos discretos, que são chamados de nós. A montagem de elementos, que constitui o Modelo Matemático, tem o seu comportamento especificado por um número finito de parâmetros. Em particular, nos problemas de Análise Estrutural, os parâmetros são os Deslocamentos Nodais, que são as incógnitas do problema [26]. As inúmeras equações algébricas geradas a partir da condição de equilíbrio de cada elemento são resolvidas por computador, através do armazenamento e processamento das informações através de matrizes, que são muito utilizadas no Método dos Elementos Finitos.

É importante lembrar que o Método dos Elementos Finitos fornece uma resposta que tanto mais se aproxima da resposta obtida no sistema físico tanto maior seja o grau de refinamento do modelo matemático. A obtenção de uma resposta exata, contudo, não é possível porque, mesmo com a utilização do mais refinado modelo matemático, não é possível fornecer a este modelo todas as informações da natureza presentes no modelo físico. Portanto, quando da execução da modelagem do problema, procura-se preservar no modelo, apenas as características mais relevantes do sistema físico, aquelas que exercem maior influência sobre os resultados a serem analisados, garantindo assim, a representação das características básicas do sistema no modelo de elementos finitos.

Os passos básicos envolvidos em qualquer análise por elementos finitos são:

- Desenvolver e discretizar a geometria em elementos;
- Considerar uma função de forma que represente o comportamento físico do elemento;
- Desenvolver as equações para o elemento;
- Construir a matriz de rigidez global do problema;
- Aplicar condições de contorno e estabelecer os carregamentos;

- Resolver o conjunto de equações diferenciais para obter os resultados nodais, como por exemplo, os deslocamentos nos nós de problemas estruturais;
- Obter os valores das tensões principais.

Quanto aos elementos, em geral, relativo à forma, quatro tipos podem ser enumerados: ponto, linha, área e volume. Um elemento pontual é definido por um nó. Os elementos de linha são representados por uma linha ou por um arco conectando dois ou três nós, os elementos de viga são exemplos dessa categoria de elementos. Nos elementos de área os formatos encontrados são o triangular e o quadrangular, que podem ser elementos sólidos bidimensionais ou elementos de casca. Os elementos de volume são tetraédricos ou cúbicos e os elementos sólidos tridimensionais são exemplos dessa categoria.

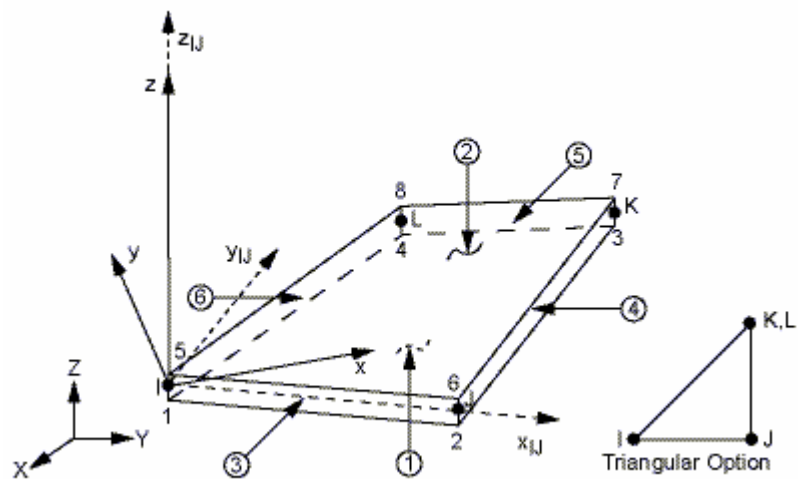
O tipo de elemento deve ser selecionado considerando-se os graus de liberdade que são suficientes para caracterizar a resposta do modelo.

Para o aprimoramento da estrutura em questão, foram desenvolvidos e analisados seis modelos diferentes de reservatório.

Para a execução dos modelos e das análises foram utilizadas as seguintes ferramentas computacionais:

- Software Pro-Engineer, versão 2000i2;
- Software Ansys, versão 9.

As geometrias propostas foram subdivididas em elementos de casca de três dimensões, o “Shell 63”, da biblioteca de elementos do software Ansys, [27]. Os elementos de casca são destinados a modelar com eficiência estruturas de espessura reduzida. O elemento “Shell 63” é definido por quatro nós com seis graus de liberdade em cada um: translação nas direções x, y e z e rotação em torno dos eixos x, y e z. Este elemento é compatível com grandes deformações. A **Figura 4.3** apresenta esse elemento.



**Figura 4.3:** Elemento de Casca “Shell 63”, [27].

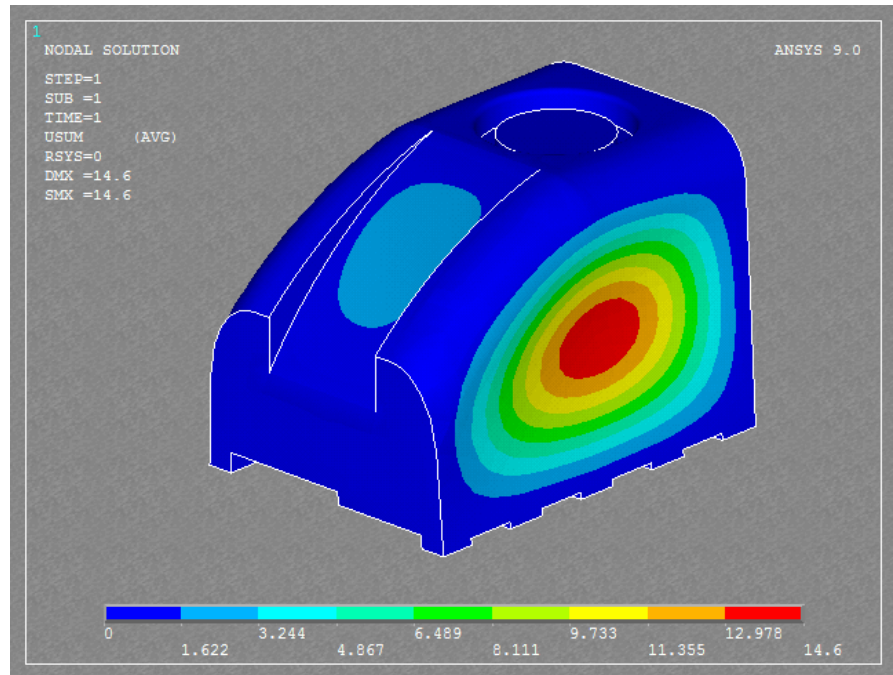
Esse elemento comporta até quatro espessuras diferentes, uma para cada nó, e a transição das espessuras ao longo da área do elemento ocorre de forma suave.

Nas análises em questão, a espessura é assumida como constante e igual para todos os elementos. Do ponto de vista da peça física, essa condição não é válida ao longo dos raios do reservatório, visto que o processo de rotomoldagem gera pequenas variações de espessura nessas regiões.

No caso da pressão, o carregamento tem que ser aplicado sobre as superfícies indicadas com os números circulados da **Figura 4.3**.

### 4.3 Resultados da Análise - Reservatório 1

A **Figura 4.4** apresenta o resultado nodal da análise da somatória dos deslocamentos nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  para o reservatório 1, cujo desenho pode ser observado no Apêndice A. O deslocamento máximo obtido na análise, 14,60mm, encontra-se próximo ao identificado no teste experimental com o protótipo do reservatório, aproximadamente 17mm.



**Figura 4.4:** Deslocamentos totais (USUM) reservatório 1.

Este resultado, considerado muito elevado, conduziu à modificação do projeto estrutural do reservatório, através da introdução de ranhuras nas laterais do tanque, que atuam como reforços estruturais. Alterações criteriosas do projeto estrutural conduziram à reduções sucessivas do deslocamento lateral máximo (flecha) do centro da lateral do tanque.

A tabela 4.1 apresenta os resultados das análises realizadas com os modelos de reservatório propostos. O Apêndice D apresenta as figuras relativas aos valores nodais dos deslocamentos e tensão de Von Mises para os sete modelos de reservatório.

**Tabela 4.1:** Resultados das análises de elementos finitos.

Reservatório	Deslocamento Máx.(mm)	$\sigma_{eq}$ (MPa)	FS
1	14,60	7,31	1,23
2	11,20	6,12	1,47
3	10,12	5,41	1,66
4	6,25	5,37	1,67
5	7,26	5,48	1,64
6	4,65	5,27	1,93
7	3,4	3,94	2,28

#### 4.6 Discussão dos Resultados

As análises por elementos finitos permitiram a identificação dos valores aproximados das tensões e dos deslocamentos laterais em toda a estrutura do reservatório. O valor do deslocamento lateral máximo obtido com a análise por elementos finitos do reservatório 1 é próximo ao deslocamento máximo verificado no teste experimental do protótipo, o que de certa forma validou o modelo de elementos finitos, permitindo assim a sua utilização com as devidas modificações para as demais geometrias propostas.

Observe que o reservatório 7 apresenta a mesma geometria do reservatório 5, porém no primeiro a espessura da parede foi aumentada para 8mm.

Comparando os resultados dos deslocamentos máximos para os reservatórios um e sete verifica-se a redução de 76,7% nos valores apresentados.

O molde foi fabricado para a manufatura da peça conforme o reservatório 7. Ao medir o deslocamento máximo com o protótipo do reservatório, constatou-se que esse não ultrapassa 1,5mm, ficando muito abaixo do valor apresentado na análise. Medindo-se os deslocamentos nas duas superfícies laterais do reservatório, constata-se que esses valores não diferem nas proporções apresentadas nas análises. Uma possível razão destas diferenças, é que as condições de contorno aplicadas às análises não traduzem com completa fidelidade as restrições reais da fixação do reservatório.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As análises foram determinantes para a conclusão do desenvolvimento do produto. A **Figura 5.1**, [28], apresenta a máquina de lavar pisos onde pode ser visto o reservatório de recolhimento (cor laranja) na sua configuração final. As alterações na geometria foram suficientes para a fabricação do reservatório com o mesmo tipo de resina e sem alterações em outros componentes da máquina, contornando as restrições impostas na definição do produto.



**Figura 5.1:** Máquina Lavadora de Pisos Renotex LST51, [28].

O presente trabalho pode ser utilizado como ponto de partida para o desenvolvimento de novos reservatórios para esse tipo de aplicação.

A diferença identificada entre o resultado da análise dos deslocamentos e o teste experimental, pode ser diminuída através da alteração da condição de contorno aplicada na análise, para melhor representar as restrições reais da fixação do reservatório, além de registrar no modelo, a pequena variação de espessura nos raios das nervuras laterais (alguns

raios ficam um pouco mais espessos que as paredes adjacentes, característica da rotomoldagem).

Após o desenvolvimento do presente estudo pode-se fazer as seguintes recomendações:

- Utilização de técnicas de análise experimental, através da aplicação de extensômetros , para a obtenção das tensões em diversos pontos do reservatório.
- Simular experimentalmente a operação da lavadora em situação de sobrecarga e por longo período de tempo, para avaliar as condições de falha do reservatório.
- Desenvolver estudos que visem o aperfeiçoamento do projeto através das análises visco-elasto-plástica, de fratura e fadiga.



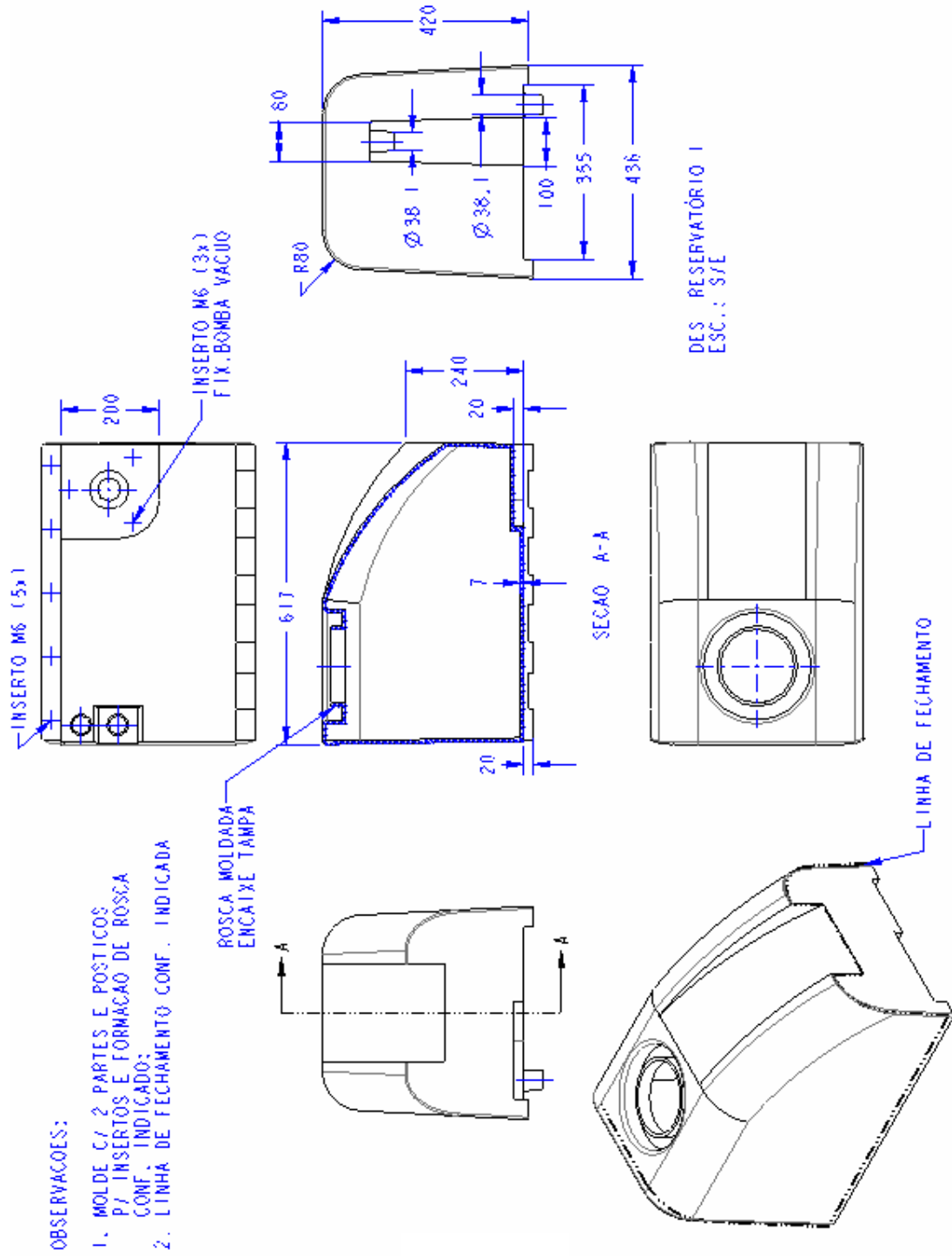
## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BERRY, DR. MICHAEL A. The business of cleaning is the protection of health; Kenan Institute of Private Enterprise; University of North Carolina at Chapel Hill; 1995.
- [2] RENOTEX IND. E COM. LTDA; reunião com o diretor da empresa, Sr. Eduardo Pereira de Mattos em 04/08/05.
- [3] TENNANT COMPANY, <http://www.tennantco.com>; acessado em maio de 2005.
- [4] COMAC SPA, <http://www.comac.it>; acessado em maio de 2005.
- [5] INTERNATIONAL SANITARY SUPPLY ASSOCIATION - (ISSA); Cleaning Times, 1991.
- [6] Cabesp Mais Vida; número 53 ; abril de 2004; Publicação da Caixa Beneficente dos Funcionários do Banco do Estado de São Paulo.
- [7] WAP DO BRASIL LTDA. Catálogo Geral Linha Amarela 2002/2003.
- [8] BIASOTTO, E. Polímeros como materiais de engenharia. São Paulo: Edgard Blucher, 1991. 197p.
- [9] SUH, N.P.; TURNER, P.L. Elements of the behavior of solid. Washington, D.C: McGraw-Hill, 1985. 615p.
- [10] ROY J. CRAWFORD; JAMES L. THRONE. Rotational Molding Technology. Norwich, New York: Plastics Design Library, William Andrew Publishing, 2002. 382p.
- [11] BLASS, A. Processamento de polímeros. Florianópolis: Ed. UFSC, 1988. 313p.
- [12] TRM RESINAS TERMOPLÁSTICAS LTDA. Correspondência trocada via e-mail com o Sr. Nilton Nicolette em 23/02/05.
- [13] CALLISTER W,D. Materials science and engineering: An Introduction. New York: John Wiley & Sons, 1997. 825p.

- [14] WYATT, O.H.; HUGHES, D.D. Metals, ceramics and polymers: An introduction to the structure and properties of engineering materials. London: Cambridge University Press, 1974. 640p.
- [15] NIELSEN, L.; LANDEL, R. F. Mechanical properties of polymers and composites. 2<sup>nd</sup>. New York: M. Dekker, 1994, 557p.
- [16] TOBOLSKY, A. V. Properties and structures of polymers. New York: John Wiley & Sons, 1960. 331p.
- [17] ANDERSON, T. L. Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications. Segunda Edição; Florida: CRC Press, 1995. 688p.
- [18] POLITENO INDÚSTRIA E COMÉRCIO S/A. Correspondência trocada via e-mail com o Sr. Sérgio Almeida em julho de 2004.
- [19] Kaminski, Paulo Carlos; Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 2000; 132p.
- [20] Vargas, Ricardo Viana; Gerenciamento de projetos: estabelecendo diferenciais competitivos; 5<sup>a</sup> edição; Rio de Janeiro, Brasport, 2003; 308p.
- [21] VAN VLACK, L. H. Princípios de ciência dos materiais. São Paulo: Edgard Blucher, 1970. 378p
- [22] MASCIA, L. Thermoplastic: Materials engineering. 2<sup>nd</sup> ed. London: Elsevier, 1989. 550p.
- [23] INTRODUCTION TO FRACTURE MECHANICS. Roylance, David; Department of Materials Science and Engineering; Massachusetts Institute of Technology; Cambridge, MA02139; Junho de 2001.
- [24] Beer, Ferdinand P.; Johnston, E. Russel; Resistência dos materiais – 2<sup>a</sup> edição; Makron Books do Brasil, São Paulo; 1989, 654p.

- [25] ROARK, RAYMOND J. Formulas for Stress and Strain; New York: Macgraw-Hill, 1954; 381p.
- [26] ALVES, A. F. Elementos finitos a base da tecnologia CAE. São Paulo: Érica, 2000. 320p.
- [27] Ansys Inc., tópicos de ajuda do software Ansys versão 9.0.
- [28] Renotex Ind. E Com. Ltda.; fotos do manual da lavadora de pisos LST51.

## APÊNDICE A – DESENHO RESERVATÓRIO DE RECOLHIMENTO 1



## APÊNDICE B – FICHA TÉCNICA DA BOMBA DE VÁCUO



Product Bulletin

**LAMB ELECTRIC**

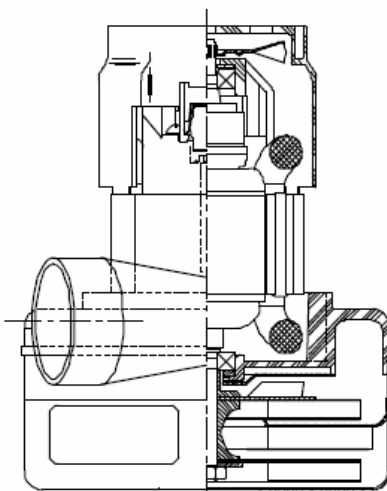
**Model: 116077-13**

**DESCRIPTION**

- Two stage
- 220 volts
- 5.7"/145 mm diameter
- Double ball bearings
- Peripheral bypass discharge
- Double insulation
- Thermoset fan bracket
- Thermoset commutator bracket

**DESIGN APPLICATION**

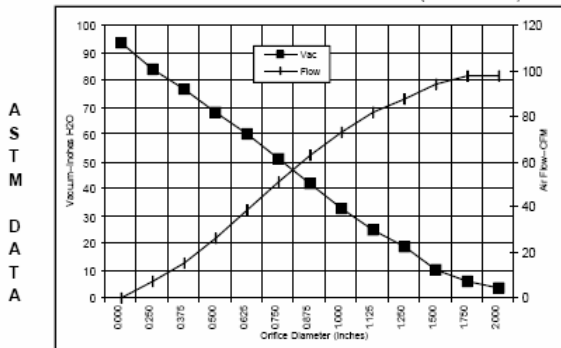
- Equipment operating in environments requiring separation of working air from motor ventilating air
- Designed to handle clean, dry, filtered air only



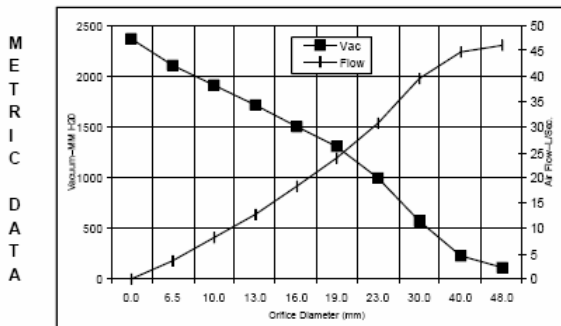
**SPECIAL FEATURES**

- Suitable for 220 volt operation, 50/60 Hz
- UL recognized, category PRGY2 (E47185)
- Epoxy painted fan case
- Skeleton-frame design
- Patented air seal bearing construction, U.S. Patent #4,088,424
- The Lamb Electric vacuum motor line offers a wide range of performance levels to meet design needs

**TYPICAL MOTOR PERFORMANCE,\*** (At 220 volts, 60Hz, test data is corrected to standard conditions of 29.92 Hg, 68° F.)



Orifice (Inches)	Amps	Watts (In)	RPM	Vac (In.H2O)	Flow (CFM)	Air Watts
2.000	5.5	1161	19359	3.5	97.3	40
1.750	5.6	1163	19383	6.0	97.7	69
1.500	5.6	1166	19390	10.5	93.7	116
1.250	5.6	1174	19358	18.9	87.4	194
1.125	5.6	1175	19366	25.0	81.2	239
1.000	5.6	1171	19402	32.5	72.8	278
0.875	5.5	1161	19507	41.6	62.9	308
0.750	5.3	1127	19525	51.0	51.0	305
0.625	5.1	1069	20440	59.8	38.2	268
0.500	4.7	965	21218	66.1	26.0	208
0.375	4.3	917	22129	76.5	15.6	140
0.250	3.9	850	22906	83.6	7.5	74
0.000	3.6	779	23590	93.5	0.0	0



Orifice (mm)	Amps	Watts (In)	RPM	Vac (mm H2O)	Flow (L/Sec)	Air Watts
48.0	5.5	1162	19370	116	46.0	53
40.0	5.6	1165	19388	232	44.8	102
30.0	5.6	1175	19362	585	39.6	219
23.0	5.5	1164	19481	909	30.9	301
19.0	5.3	1126	19837	1300	24.0	304
16.0	5.1	1071	20415	1510	18.3	269
13.0	4.7	1002	21140	1709	12.8	214
10.0	4.3	929	21992	1911	8.1	150
6.5	3.9	853	22867	2114	3.7	77
0.0	3.6	779	23590	2375	0.0	0

Note: Metric performance data is calculated from the ASTM data above.

\* Data represents performance of a typical motor sampled from a large production quantity. Individual motor data may vary due to normal manufacturing variat

Test Specs:	220 volts	Minimum Sealed Vacuum:	90.0"	ORIFICE:	13 mm	Minimum Vacuum:	64.0"	Maximum Watts:	1100
-------------	-----------	------------------------	-------	----------	-------	-----------------	-------	----------------	------

## APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

**Tabela 1:** Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio do corpo de prova CP 1

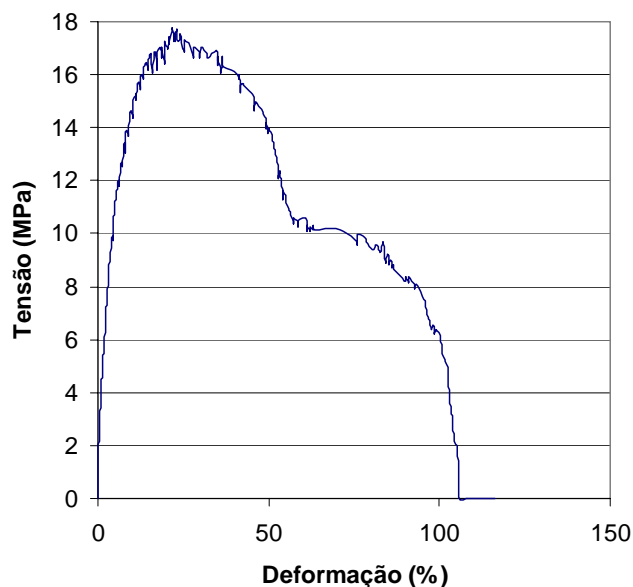
Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)	Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)
0	60,8	0,00	0,00	3,12	509,95	6,24	11,80
0,04	72,57	0,08	1,68	3,21	515,84	6,42	11,93
0,08	84,34	0,16	1,95	3,25	537,41	6,50	12,43
0,12	94,15	0,24	2,18	3,33	543,3	6,66	12,57
0,16	105,91	0,32	2,45	3,46	549,18	6,92	12,70
0,2	115,72	0,40	2,68	3,62	541,34	7,24	12,52
0,24	123,57	0,48	2,86	3,67	562,91	7,34	13,02
0,28	131,41	0,56	3,04	3,71	568,79	7,42	13,16
0,33	139,26	0,66	3,22	3,83	574,68	7,66	13,29
0,37	147,1	0,74	3,40	3,92	580,56	7,84	13,43
0,41	158,87	0,82	3,67	4	564,87	8,00	13,07
0,45	166,72	0,90	3,86	4,08	592,33	8,16	13,70
0,49	176,52	0,98	4,08	4,21	600,18	8,42	13,88
0,54	190,25	1,08	4,40	4,42	590,37	8,84	13,66
0,58	198,1	1,16	4,58	4,54	596,25	9,08	13,79
0,62	205,94	1,24	4,76	4,59	621,75	9,18	14,38
0,66	213,79	1,32	4,95	4,71	627,64	9,42	14,52
0,7	221,63	1,40	5,13	4,8	633,52	9,60	14,65
0,74	231,44	1,48	5,35	5	619,79	10,00	14,34
0,79	237,32	1,58	5,49	5,04	643,33	10,08	14,88
0,83	245,17	1,66	5,67	5,17	649,21	10,34	15,02
0,87	251,05	1,74	5,81	5,3	655,09	10,60	15,15
0,95	258,9	1,90	5,99	5,46	660,98	10,92	15,29
1	270,67	2,00	6,26	5,59	655,09	11,18	15,15
1,04	282,44	2,08	6,53	5,63	649,21	11,26	15,02
1,08	290,28	2,16	6,71	5,67	668,82	11,34	15,47
1,12	296,17	2,24	6,85	5,8	674,71	11,60	15,61
1,16	304,01	2,32	7,03	5,96	680,59	11,92	15,74
1,2	309,9	2,40	7,17	6,17	666,86	12,34	15,43
1,25	315,78	2,50	7,30	6,22	686,48	12,44	15,88
1,29	321,66	2,58	7,44	6,38	692,36	12,76	16,02
1,33	327,55	2,66	7,58	6,67	684,51	13,34	15,83
1,37	333,43	2,74	7,71	6,72	698,24	13,44	16,15
1,5	353,04	3,00	8,17	6,8	706,09	13,60	16,33
1,54	358,93	3,08	8,30	7,01	711,97	14,02	16,47
1,58	364,81	3,16	8,44	7,34	698,24	14,68	16,15
1,62	370,7	3,24	8,58	7,38	713,94	14,76	16,51
1,66	376,58	3,32	8,71	7,55	719,82	15,10	16,65
1,75	386,39	3,50	8,94	7,8	725,7	15,60	16,79
1,83	394,23	3,66	9,12	8,09	694,32	16,18	16,06
1,91	407,96	3,82	9,44	8,14	723,74	16,28	16,74
2	415,81	4,00	9,62	8,38	729,63	16,76	16,88
2,04	421,69	4,08	9,75	8,64	698,24	17,28	16,15
2,12	429,54	4,24	9,94	8,68	711,97	17,36	16,47
2,16	421,69	4,32	9,75	8,72	729,63	17,44	16,88
2,21	427,58	4,42	9,89	9,01	735,51	18,02	17,01
2,29	455,04	4,58	10,53	9,26	725,7	18,52	16,79
2,37	462,88	4,74	10,71	9,3	719,82	18,60	16,65
2,46	470,73	4,92	10,89	9,35	735,51	18,70	17,01
2,54	480,53	5,08	11,12	9,72	708,05	19,44	16,38
2,62	488,38	5,24	11,30	9,76	737,47	19,52	17,06
2,71	498,19	5,42	11,52	9,81	745,32	19,62	17,24
2,87	506,03	5,74	11,71	10,31	733,55	20,62	16,97
2,96	513,88	5,92	11,89	10,35	753,16	20,70	17,42
3,04	519,76	6,08	12,02	10,43	741,39	20,86	17,15

**Tabela 1:** Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio do corpo de prova CP 1  
Continuação

Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)	Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)
10,93	768,85	21,86	17,79	24,13	629,6	48,26	14,56
11,02	747,28	22,04	17,29	24,38	623,71	48,76	14,43
11,18	755,12	22,36	17,47	24,55	617,83	49,10	14,29
11,22	745,32	22,44	17,24	24,59	602,14	49,18	13,93
11,35	759,05	22,70	17,56	24,67	611,94	49,34	14,16
11,39	753,16	22,78	17,42	24,88	606,06	49,76	14,02
11,43	764,93	22,86	17,69	24,96	596,25	49,92	13,79
11,52	751,2	23,04	17,38	25,09	604,1	50,18	13,97
11,68	745,32	23,36	17,24	25,3	598,22	50,60	13,84
11,89	751,2	23,78	17,38	25,42	592,33	50,84	13,70
12,06	759,05	24,12	17,56	25,59	586,45	51,18	13,57
12,56	727,66	25,12	16,83	25,72	580,56	51,44	13,43
12,6	743,36	25,20	17,20	25,84	574,68	51,68	13,29
12,73	749,24	25,46	17,33	25,92	568,79	51,84	13,16
13,4	743,36	26,80	17,20	26,05	562,91	52,10	13,02
13,86	727,66	27,72	16,83	26,18	557,03	52,36	12,89
13,9	719,82	27,80	16,65	26,26	551,14	52,52	12,75
13,94	725,7	27,88	16,79	26,34	545,26	52,68	12,61
13,98	737,47	27,96	17,06	26,47	537,41	52,94	12,43
14,9	729,63	29,80	16,88	26,51	521,72	53,02	12,07
14,94	717,86	29,88	16,61	26,55	533,49	53,10	12,34
14,98	737,47	29,96	17,06	26,68	527,61	53,36	12,20
15,44	731,59	30,88	16,92	26,8	521,72	53,60	12,07
16,07	725,7	32,14	16,79	26,93	513,88	53,86	11,89
16,24	717,86	32,48	16,61	27,05	506,03	54,10	11,71
17,36	731,59	34,72	16,92	27,09	488,38	54,18	11,30
17,45	723,74	34,90	16,74	27,14	502,11	54,28	11,61
17,49	706,09	34,98	16,33	27,3	496,22	54,60	11,48
17,53	711,97	35,06	16,47	27,43	490,34	54,86	11,34
17,57	721,78	35,14	16,70	27,6	484,46	55,20	11,21
17,62	713,94	35,24	16,51	27,76	478,57	55,52	11,07
17,99	704,13	35,98	16,29	27,93	472,69	55,86	10,93
18,03	694,32	36,06	16,06	28,1	466,8	56,20	10,80
18,12	710,01	36,24	16,42	28,47	458,96	56,94	10,62
18,16	721,78	36,32	16,70	28,6	449,15	57,20	10,39
18,24	711,97	36,48	16,47	28,64	458,96	57,28	10,62
18,41	704,13	36,82	16,29	29,18	453,07	58,36	10,48
19,54	698,24	39,08	16,15	29,22	443,27	58,44	10,25
20,37	692,36	40,74	16,02	29,26	453,07	58,52	10,48
20,66	684,51	41,32	15,83	29,89	458,96	59,78	10,62
20,7	692,36	41,40	16,02	30,56	453,07	61,12	10,48
20,75	680,59	41,50	15,74	30,6	435,42	61,20	10,07
20,79	672,75	41,58	15,56	30,64	445,23	61,28	10,30
20,83	662,94	41,66	15,34	30,98	435,42	61,96	10,07
20,87	670,79	41,74	15,52	31,02	443,27	62,04	10,25
21	676,67	42,00	15,65	31,48	437,38	62,96	10,12
21,71	670,79	43,42	15,52	31,52	445,23	63,04	10,30
22,25	664,9	44,50	15,38	31,77	439,34	63,54	10,16
22,63	659,02	45,26	15,24	33,28	441,31	66,56	10,21
22,88	651,17	45,76	15,06	34,78	441,31	69,56	10,21
22,92	641,37	45,84	14,84	35,95	435,42	71,90	10,07
22,96	633,52	45,92	14,65	36,99	429,54	73,98	9,94
23,04	647,25	46,08	14,97	37,87	419,73	75,74	9,71
23,59	641,37	47,18	14,84	37,91	413,85	75,82	9,57
23,88	635,48	47,76	14,70	38,04	431,5	76,08	9,98

**Tabela 1:** Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio do corpo de prova CP 1  
Continuação

Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)	Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)
39	425,62	78,00	9,85	51,48	164,75	102,96	3,81
39,29	417,77	78,58	9,66	51,57	156,91	103,14	3,63
40,21	406	80,42	9,39	51,65	149,06	103,30	3,45
40,75	413,85	81,50	9,57	51,77	141,22	103,54	3,27
41,17	402,08	82,34	9,30	51,82	135,33	103,64	3,13
41,79	417,77	83,58	9,66	51,86	129,45	103,72	2,99
41,84	402,08	83,68	9,30	51,94	121,6	103,88	2,81
42,25	384,43	84,50	8,89	52,07	100,03	104,14	2,31
42,34	398,16	84,68	9,21	52,15	94,15	104,30	2,18
42,54	392,27	85,08	9,07	52,36	88,26	104,72	2,04
42,71	382,47	85,42	8,85	52,53	82,38	105,06	1,91
42,8	388,35	85,60	8,98	52,65	76,49	105,30	1,77
43,05	382,47	86,10	8,85	52,69	70,61	105,38	1,63
43,13	376,58	86,26	8,71	52,74	62,76	105,48	1,45
43,17	382,47	86,34	8,85	52,78	1,96	105,56	0,05
43,34	374,62	86,68	8,67	54,28	0	108,56	0,00
44,05	364,81	88,10	8,44	55,78	0	111,56	0,00
44,97	355,01	89,94	8,21	57,29	0	114,58	0,00
45,01	362,85	90,02	8,39	58,16	0	116,32	0,00
45,55	353,04	91,10	8,17				
45,59	360,89	91,18	8,35				
45,93	355,01	91,86	8,21				
46,3	349,12	92,60	8,08				
46,47	343,24	92,94	7,94				
46,51	349,12	93,02	8,08				
46,97	343,24	93,94	7,94				
47,35	337,35	94,70	7,80				
47,52	329,51	95,04	7,62				
47,93	323,62	95,86	7,49				
48,02	317,74	96,04	7,35				
48,06	307,93	96,12	7,12				
48,22	302,05	96,44	6,99				
48,43	296,17	96,86	6,85				
48,6	290,28	97,20	6,71				
48,73	276,55	97,46	6,40				
49,02	282,44	98,04	6,53				
49,27	276,55	98,54	6,40				
49,31	268,71	98,62	6,22				
49,44	276,55	98,88	6,40				
49,85	270,67	99,70	6,26				
50,1	264,78	100,20	6,12				
50,23	258,9	100,46	5,99				
50,31	251,05	100,62	5,81				
50,4	243,21	100,80	5,63				
50,48	237,32	100,96	5,49				
50,65	231,44	101,30	5,35				
50,86	225,56	101,72	5,22				
51,02	219,67	102,04	5,08				
51,15	213,79	102,30	4,95				
51,23	205,94	102,46	4,76				
51,27	200,06	102,54	4,63				
51,32	192,21	102,64	4,45				
51,36	184,37	102,72	4,26				
51,4	178,48	102,80	4,13				
51,44	170,64	102,88	3,95				



**Figura 1:** Curva tensão-deformação para o corpo de prova CP 1



**Tabela 2:** Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio do corpo de prova CP 2

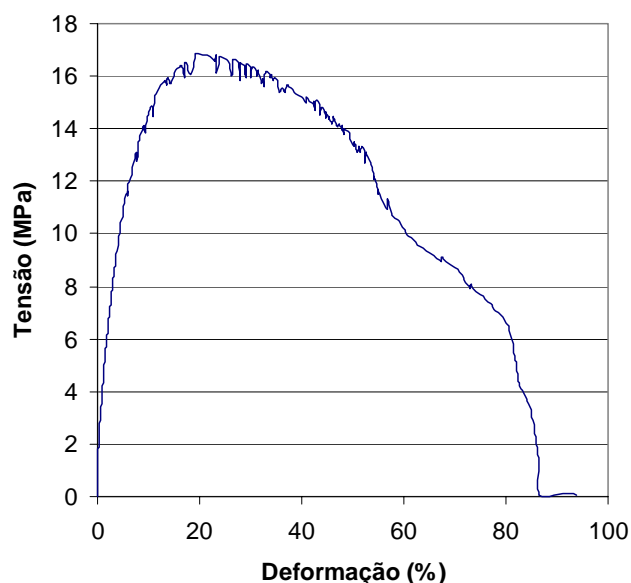
Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)	Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)
0	60,8	0,00	0,00	3	523,68	6,00	11,84
0,04	72,57	0,08	1,64	3,08	529,57	6,16	11,98
0,08	84,34	0,16	1,91	3,21	537,41	6,42	12,15
0,12	96,11	0,24	2,17	3,34	547,22	6,68	12,37
0,16	105,91	0,32	2,40	3,42	555,07	6,84	12,55
0,2	117,68	0,40	2,66	3,5	560,95	7,00	12,69
0,25	127,49	0,50	2,88	3,63	568,79	7,26	12,86
0,29	137,3	0,58	3,10	3,67	574,68	7,34	13,00
0,33	147,1	0,66	3,33	3,8	580,56	7,60	13,13
0,37	156,91	0,74	3,55	3,84	564,87	7,68	12,77
0,41	166,72	0,82	3,77	3,92	572,72	7,84	12,95
0,46	176,52	0,92	3,99	3,96	584,49	7,92	13,22
0,5	184,37	1,00	4,17	4	594,29	8,00	13,44
0,54	192,21	1,08	4,35	4,05	600,18	8,10	13,57
0,62	209,87	1,24	4,75	4,13	606,06	8,26	13,71
0,66	217,71	1,32	4,92	4,26	611,94	8,52	13,84
0,71	225,56	1,42	5,10	4,42	617,83	8,84	13,97
0,75	233,4	1,50	5,28	4,59	623,71	9,18	14,10
0,79	243,21	1,58	5,50	4,76	611,94	9,52	13,84
0,83	251,05	1,66	5,68	4,8	637,44	9,60	14,42
0,87	258,9	1,74	5,85	4,96	643,33	9,92	14,55
0,92	266,75	1,84	6,03	5,09	651,17	10,18	14,73
0,96	274,59	1,92	6,21	5,26	657,06	10,52	14,86
1	282,44	2,00	6,39	5,42	649,21	10,84	14,68
1,04	288,32	2,08	6,52	5,47	639,4	10,94	14,46
1,08	294,2	2,16	6,65	5,63	668,82	11,26	15,12
1,12	302,05	2,24	6,83	5,76	676,67	11,52	15,30
1,16	307,93	2,32	6,96	5,93	682,55	11,86	15,44
1,21	315,78	2,42	7,14	6,09	688,44	12,18	15,57
1,25	323,62	2,50	7,32	6,3	694,32	12,60	15,70
1,29	329,51	2,58	7,45	6,68	700,21	13,36	15,83
1,33	335,39	2,66	7,58	6,72	692,36	13,44	15,66
1,37	341,28	2,74	7,72	6,76	700,21	13,52	15,83
1,42	347,16	2,84	7,85	6,97	706,09	13,94	15,97
1,46	353,04	2,92	7,98	7,22	694,32	14,44	15,70
1,54	364,81	3,08	8,25	7,51	713,94	15,02	16,15
1,58	370,7	3,16	8,38	7,8	719,82	15,60	16,28
1,62	376,58	3,24	8,52	8,3	725,7	16,60	16,41
1,67	382,47	3,34	8,65	8,43	711,97	16,86	16,10
1,71	388,35	3,42	8,78	8,47	706,09	16,94	15,97
1,79	398,16	3,58	9,00	8,51	725,7	17,02	16,41
1,83	404,04	3,66	9,14	8,72	731,59	17,44	16,54
1,92	413,85	3,84	9,36	9,06	710,01	18,12	16,06
2	423,65	4,00	9,58	9,52	737,47	19,04	16,68
2,08	433,46	4,16	9,80	9,56	745,32	19,12	16,85
2,17	443,27	4,34	10,02	11,06	739,43	22,12	16,72
2,25	453,07	4,50	10,25	11,52	733,55	23,04	16,59
2,38	466,8	4,76	10,56	11,56	743,36	23,12	16,81
2,46	474,65	4,92	10,73	11,6	713,94	23,20	16,15
2,54	484,46	5,08	10,96	11,73	719,82	23,46	16,28
2,63	494,26	5,26	11,18	11,85	733,55	23,70	16,59
2,71	502,11	5,42	11,35	11,94	739,43	23,88	16,72
2,79	507,99	5,58	11,49	12,82	733,55	25,64	16,59
2,88	513,88	5,76	11,62	13,02	708,05	26,04	16,01
2,96	506,03	5,92	11,44				

**Tabela 2:** Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio do corpo de prova CP 2  
Continuação

Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)	Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)
13,23	715,9	26,46	16,19	23,05	639,4	46,10	14,46
13,27	735,51	26,54	16,63	23,17	633,52	46,34	14,33
13,78	729,63	27,56	16,50	23,38	627,64	46,76	14,19
13,94	700,21	27,88	15,83	23,55	621,75	47,10	14,06
13,98	721,78	27,96	16,32	23,71	627,64	47,42	14,19
14,03	731,59	28,06	16,54	23,96	615,87	47,92	13,93
14,4	725,7	28,80	16,41	24,01	623,71	48,02	14,10
14,48	719,82	28,96	16,28	24,13	609,98	48,26	13,79
14,53	704,13	29,06	15,92	24,17	619,79	48,34	14,02
14,57	727,66	29,14	16,46	24,59	613,91	49,18	13,88
14,99	721,78	29,98	16,32	24,76	608,02	49,52	13,75
15,03	704,13	30,06	15,92	24,92	596,25	49,84	13,48
15,07	710,01	30,14	16,06	25,13	588,41	50,26	13,31
15,11	723,74	30,22	16,37	25,18	598,22	50,36	13,53
15,53	715,9	31,06	16,19	25,34	592,33	50,68	13,40
15,66	708,05	31,32	16,01	25,47	580,56	50,94	13,13
15,7	717,86	31,40	16,23	25,55	590,37	51,10	13,35
16,07	694,32	32,14	15,70	25,64	584,49	51,28	13,22
16,16	702,17	32,32	15,88	25,8	578,6	51,60	13,08
16,32	690,4	32,64	15,61	25,93	588,41	51,86	13,31
16,36	702,17	32,72	15,88	26,14	582,52	52,28	13,17
16,41	715,9	32,82	16,19	26,22	560,95	52,44	12,69
16,86	710,01	33,72	16,06	26,3	578,6	52,60	13,08
16,91	704,13	33,82	15,92	26,47	572,72	52,94	12,95
16,99	710,01	33,98	16,06	26,6	566,83	53,20	12,82
17,24	700,21	34,48	15,83	26,76	560,95	53,52	12,69
17,28	706,09	34,56	15,97	26,93	553,1	53,86	12,51
17,7	700,21	35,40	15,83	27,01	533,49	54,02	12,06
17,78	680,59	35,56	15,39	27,06	539,37	54,12	12,20
18,12	686,48	36,24	15,52	27,26	533,49	54,52	12,06
18,45	680,59	36,90	15,39	27,39	527,61	54,78	11,93
18,58	692,36	37,16	15,66	27,51	509,95	55,02	11,53
18,95	686,48	37,90	15,52	27,56	515,84	55,12	11,67
19,2	680,59	38,40	15,39	27,6	507,99	55,20	11,49
20,12	670,79	40,24	15,17	27,81	502,11	55,62	11,35
20,37	662,94	40,74	14,99	27,97	496,22	55,94	11,22
20,42	672,75	40,84	15,21	28,1	490,34	56,20	11,09
20,79	664,9	41,58	15,04	28,31	484,46	56,62	10,96
21,17	659,02	42,34	14,90	28,35	502,11	56,70	11,35
21,21	664,9	42,42	15,04	28,48	496,22	56,96	11,22
21,29	649,21	42,58	14,68	28,6	490,34	57,20	11,09
21,33	659,02	42,66	14,90	28,73	482,49	57,46	10,91
21,42	666,86	42,84	15,08	28,85	476,61	57,70	10,78
21,71	660,98	43,42	14,95	28,98	470,73	57,96	10,65
21,75	655,09	43,50	14,81	29,39	464,84	58,78	10,51
21,79	643,33	43,58	14,55	29,64	458,96	59,28	10,38
21,88	655,09	43,76	14,81	29,9	453,07	59,80	10,25
22,17	649,21	44,34	14,68	30,1	447,19	60,20	10,11
22,29	637,44	44,58	14,42	30,35	441,31	60,70	9,98
22,42	647,25	44,84	14,64	30,69	435,42	61,38	9,85
22,54	641,37	45,08	14,50	31,06	429,54	62,12	9,71
22,67	633,52	45,34	14,33	31,31	423,65	62,62	9,58
22,71	639,4	45,42	14,46	31,9	417,77	63,80	9,45
23	627,64	46,00	14,19	32,15	411,89	64,30	9,31

**Tabela 2:** Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio do corpo de prova CP 2  
Continuação

Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)	Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)
32,9	406	65,80	9,18	43,13	72,57	86,26	1,64
33,28	400,12	66,56	9,05	43,17	66,69	86,34	1,51
33,61	394,23	67,22	8,92	43,22	52,96	86,44	1,20
33,65	402,08	67,30	9,09	43,26	1,96	86,52	0,04
34,11	396,19	68,22	8,96	44,76	1,96	89,52	0,04
34,53	390,31	69,06	8,83	46,26	3,92	92,52	0,09
35,07	384,43	70,14	8,69	46,98	1,96	93,96	0,04
35,41	378,54	70,82	8,56				
35,7	372,66	71,40	8,43				
35,87	366,77	71,74	8,29				
36,03	360,89	72,06	8,16				
36,28	355,01	72,56	8,03				
36,53	349,12	73,06	7,90				
36,62	358,93	73,24	8,12				
36,78	351,08	73,56	7,94				
36,99	345,2	73,98	7,81				
37,45	339,32	74,90	7,67				
37,91	333,43	75,82	7,54				
38,29	327,55	76,58	7,41				
38,62	321,66	77,24	7,27				
38,83	315,78	77,66	7,14				
39,29	309,9	78,58	7,01				
39,58	304,01	79,16	6,87				
39,83	298,13	79,66	6,74				
40,04	292,24	80,08	6,61				
40,25	286,36	80,50	6,48				
40,34	280,47	80,68	6,34				
40,46	272,63	80,92	6,17				
40,54	264,78	81,08	5,99				
40,67	256,94	81,34	5,81				
40,75	247,13	81,50	5,59				
40,84	237,32	81,68	5,37				
40,88	231,44	81,76	5,23				
40,96	225,56	81,92	5,10				
41	219,67	82,00	4,97				
41,09	213,79	82,18	4,83				
41,13	205,94	82,26	4,66				
41,17	200,06	82,34	4,52				
41,25	192,21	82,50	4,35				
41,38	186,33	82,76	4,21				
41,54	180,45	83,08	4,08				
41,71	174,56	83,42	3,95				
41,88	168,68	83,76	3,81				
42	162,79	84,00	3,68				
42,17	156,91	84,34	3,55				
42,3	151,02	84,60	3,42				
42,46	145,14	84,92	3,28				
42,55	137,3	85,10	3,10				
42,67	127,49	85,34	2,88				
42,76	121,6	85,52	2,75				
42,84	111,8	85,68	2,53				
42,92	100,03	85,84	2,26				
43,01	90,22	86,02	2,04				
43,09	82,38	86,18	1,86				



**Figura 2:** Curva tensão-deformação para o corpo de prova CP 2

**Tabela 3:** Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio do corpo de prova CP 3

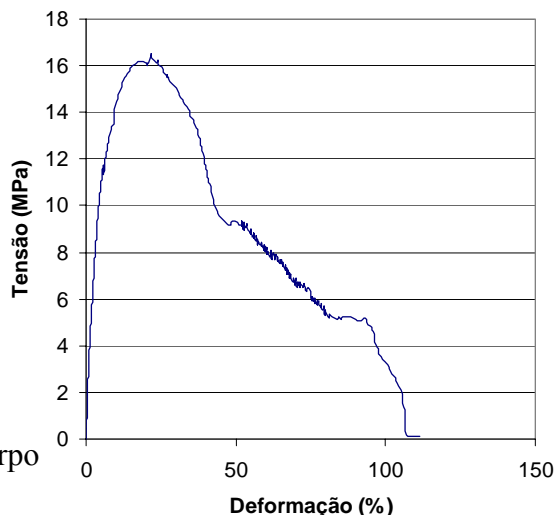
Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)	Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)
0	11,77	0,00	0,00	2,58	490,34	5,16	11,09
0,04	19,61	0,08	0,44	2,67	498,19	5,34	11,27
0,08	29,42	0,16	0,67	2,75	506,03	5,50	11,44
0,12	41,19	0,24	0,93	2,84	513,88	5,68	11,62
0,16	56,88	0,32	1,29	2,92	519,76	5,84	11,75
0,2	68,65	0,40	1,55	2,96	502,11	5,92	11,35
0,25	82,38	0,50	1,86	3,04	509,95	6,08	11,53
0,29	94,15	0,58	2,13	3,13	517,8	6,26	11,71
0,33	107,87	0,66	2,44	3,21	527,61	6,42	11,93
0,37	119,64	0,74	2,71	3,34	533,49	6,68	12,06
0,41	131,41	0,82	2,97	3,42	541,34	6,84	12,24
0,46	141,22	0,92	3,19	3,5	547,22	7,00	12,37
0,5	152,99	1,00	3,46	3,59	555,07	7,18	12,55
0,54	162,79	1,08	3,68	3,71	560,95	7,42	12,69
0,58	172,6	1,16	3,90	3,84	566,83	7,68	12,82
0,62	184,37	1,24	4,17	3,88	572,72	7,76	12,95
0,66	192,21	1,32	4,35	4	578,6	8,00	13,08
0,71	202,02	1,42	4,57	4,13	586,45	8,26	13,26
0,75	209,87	1,50	4,75	4,3	592,33	8,60	13,40
0,79	219,67	1,58	4,97	4,55	598,22	9,10	13,53
0,83	229,48	1,66	5,19	4,59	604,1	9,18	13,66
0,87	237,32	1,74	5,37	4,67	613,91	9,34	13,88
0,91	247,13	1,82	5,59	4,76	619,79	9,52	14,02
0,96	253,02	1,92	5,72	4,92	631,56	9,84	14,28
1	258,9	2,00	5,85	5,05	639,4	10,10	14,46
1,04	266,75	2,08	6,03	5,26	645,29	10,52	14,59
1,08	274,59	2,16	6,21	5,42	651,17	10,84	14,73
1,12	284,4	2,24	6,43	5,59	657,06	11,18	14,86
1,16	290,28	2,32	6,56	5,76	662,94	11,52	14,99
1,25	309,9	2,50	7,01	5,92	668,82	11,84	15,12
1,29	315,78	2,58	7,14	6,09	674,71	12,18	15,26
1,33	323,62	2,66	7,32	6,3	680,59	12,60	15,39
1,37	331,47	2,74	7,50	6,59	686,48	13,18	15,52
1,42	339,32	2,84	7,67	6,93	692,36	13,86	15,66
1,46	345,2	2,92	7,81	7,26	698,24	14,52	15,79
1,5	351,08	3,00	7,94	7,55	704,13	15,10	15,92
1,54	356,97	3,08	8,07	8,1	710,01	16,20	16,06
1,58	364,81	3,16	8,25	8,64	715,9	17,28	16,19
1,62	370,7	3,24	8,38	10,14	713,94	20,28	16,15
1,67	376,58	3,34	8,52	10,31	708,05	20,62	16,01
1,71	382,47	3,42	8,65	10,56	719,82	21,12	16,28
1,75	388,35	3,50	8,78	10,89	729,63	21,78	16,50
1,79	394,23	3,58	8,92	10,94	723,74	21,88	16,37
1,83	402,08	3,66	9,09	11,35	717,86	22,70	16,23
1,88	407,96	3,76	9,23	11,73	711,97	23,46	16,10
1,96	417,77	3,92	9,45	11,9	717,86	23,80	16,23
2	423,65	4,00	9,58	11,94	710,01	23,88	16,06
2,08	435,42	4,16	9,85	12,56	704,13	25,12	15,92
2,17	443,27	4,34	10,02	12,9	696,28	25,80	15,75
2,21	449,15	4,42	10,16	13,32	690,4	26,64	15,61
2,25	455,04	4,50	10,29	13,52	684,51	27,04	15,48
2,29	460,92	4,58	10,42	13,57	690,4	27,14	15,61
2,38	468,77	4,76	10,60	13,73	684,51	27,46	15,48
2,46	474,65	4,92	10,73	14,07	678,63	28,14	15,35
2,54	484,46	5,08	10,96	14,4	672,75	28,80	15,21

**Tabela 3:** Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio do corpo de prova CP 3  
Continuação

Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)	Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)
14,78	666,86	29,56	15,08	26,8	407,96	53,60	9,23
15,32	660,98	30,64	14,95	26,89	400,12	53,78	9,05
15,61	655,09	31,22	14,81	27,39	390,31	54,78	8,83
15,86	647,25	31,72	14,64	27,47	398,16	54,94	9,00
16,2	641,37	32,40	14,50	27,51	388,35	55,02	8,78
16,45	635,48	32,90	14,37	27,6	394,23	55,20	8,92
16,95	629,6	33,90	14,24	27,68	382,47	55,36	8,65
17,12	623,71	34,24	14,10	27,85	390,31	55,70	8,83
17,24	617,83	34,48	13,97	27,89	380,5	55,78	8,60
17,41	611,94	34,82	13,84	27,97	390,31	55,94	8,83
17,74	606,06	35,48	13,71	28,02	382,47	56,04	8,65
18,03	600,18	36,06	13,57	28,39	374,62	56,78	8,47
18,24	594,29	36,48	13,44	28,43	386,39	56,86	8,74
18,41	588,41	36,82	13,31	28,52	376,58	57,04	8,52
18,58	582,52	37,16	13,17	28,64	368,74	57,28	8,34
18,74	576,64	37,48	13,04	28,72	378,54	57,44	8,56
18,91	570,76	37,82	12,91	28,81	372,66	57,62	8,43
19,04	564,87	38,08	12,77	29,1	366,77	58,20	8,29
19,16	558,99	38,32	12,64	29,18	372,66	58,36	8,43
19,29	553,1	38,58	12,51	29,27	364,81	58,54	8,25
19,41	547,22	38,82	12,37	29,39	370,7	58,78	8,38
19,5	541,34	39,00	12,24	29,44	362,85	58,88	8,21
19,66	533,49	39,32	12,06	29,64	356,97	59,28	8,07
19,79	527,61	39,58	11,93	29,73	368,74	59,46	8,34
19,91	519,76	39,82	11,75	29,81	362,85	59,62	8,21
20,08	513,88	40,16	11,62	29,9	355,01	59,80	8,03
20,16	507,99	40,32	11,49	29,98	364,81	59,96	8,25
20,25	502,11	40,50	11,35	30,06	355,01	60,12	8,03
20,37	494,26	40,74	11,18	30,14	362,85	60,28	8,21
20,5	488,38	41,00	11,04	30,23	356,97	60,46	8,07
20,58	482,49	41,16	10,91	30,27	349,12	60,54	7,90
20,75	474,65	41,50	10,73	30,4	355,01	60,80	8,03
20,92	468,77	41,84	10,60	30,52	345,2	61,04	7,81
21,08	460,92	42,16	10,42	30,77	351,08	61,54	7,94
21,25	453,07	42,50	10,25	30,81	356,97	61,62	8,07
21,33	447,19	42,66	10,11	30,94	347,16	61,88	7,85
21,5	441,31	43,00	9,98	30,98	341,28	61,96	7,72
21,67	435,42	43,34	9,85	31,06	347,16	62,12	7,85
22,04	429,54	44,08	9,71	31,27	353,04	62,54	7,98
22,29	423,65	44,58	9,58	31,4	339,32	62,80	7,67
22,59	417,77	45,18	9,45	31,48	351,08	62,96	7,94
23,05	411,89	46,10	9,31	31,56	343,24	63,12	7,76
23,88	406	47,76	9,18	31,77	349,12	63,54	7,90
24,55	411,89	49,10	9,31	31,86	337,35	63,72	7,63
25,84	406	51,68	9,18	31,94	345,2	63,88	7,81
25,89	411,89	51,78	9,31	32,02	339,32	64,04	7,67
25,97	402,08	51,94	9,09	32,32	333,43	64,64	7,54
26,01	413,85	52,02	9,36	32,44	341,28	64,88	7,72
26,14	398,16	52,28	9,00	32,57	333,43	65,14	7,54
26,18	409,92	52,36	9,27	32,65	339,32	65,30	7,67
26,3	396,19	52,60	8,96	32,78	327,55	65,56	7,41
26,34	409,92	52,68	9,27	32,9	335,39	65,80	7,58
26,43	400,12	52,86	9,05	33,11	325,59	66,22	7,36
26,51	406	53,02	9,18	33,19	319,7	66,38	7,23
26,64	400,12	53,28	9,05	33,24	329,51	66,48	7,45

**Tabela 3:** Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio do corpo de prova CP 3  
 Continuação

Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)	Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)
33,32	319,7	66,64	7,23	40,63	237,32	81,26	5,37
33,4	325,59	66,80	7,36	41	231,44	82,00	5,23
33,53	311,86	67,06	7,05	41,88	225,56	83,76	5,10
33,61	321,66	67,22	7,27	42,09	231,44	84,18	5,23
33,7	311,86	67,40	7,05	42,71	225,56	85,42	5,10
33,78	319,7	67,56	7,23	42,76	231,44	85,52	5,23
33,86	313,82	67,72	7,10	44,26	231,44	88,52	5,23
33,9	305,97	67,80	6,92	45,76	223,6	91,52	5,06
33,94	315,78	67,88	7,14	46,68	229,48	93,36	5,19
34,03	305,97	68,06	6,92	46,72	223,6	93,44	5,06
34,11	311,86	68,22	7,05	47,14	217,71	94,28	4,92
34,2	304,01	68,40	6,87	47,6	211,83	95,20	4,79
34,66	296,17	69,32	6,70	47,81	205,94	95,62	4,66
34,7	305,97	69,40	6,92	48,06	200,06	96,12	4,52
34,82	300,09	69,64	6,79	48,14	192,21	96,28	4,35
34,86	292,24	69,72	6,61	48,23	186,33	96,46	4,21
34,95	304,01	69,90	6,87	48,39	178,48	96,78	4,04
35,11	294,2	70,22	6,65	48,52	172,6	97,04	3,90
35,2	288,32	70,40	6,52	48,73	166,72	97,46	3,77
35,24	298,13	70,48	6,74	48,9	160,83	97,80	3,64
35,41	292,24	70,82	6,61	49,23	154,95	98,46	3,50
35,49	298,13	70,98	6,74	49,9	147,1	99,80	3,33
35,66	286,36	71,32	6,48	50,4	141,22	100,80	3,19
35,82	296,17	71,64	6,70	50,65	135,33	101,30	3,06
36,07	288,32	72,14	6,52	50,9	129,45	101,80	2,93
36,28	294,2	72,56	6,65	51,11	123,57	102,22	2,79
36,7	288,32	73,40	6,52	51,48	117,68	102,96	2,66
36,78	280,47	73,56	6,34	51,78	111,8	103,56	2,53
37,08	288,32	74,16	6,52	51,98	105,91	103,96	2,40
37,41	280,47	74,82	6,34	52,19	100,03	104,38	2,26
37,5	270,67	75,00	6,12	52,49	94,15	104,98	2,13
37,66	264,78	75,32	5,99	52,7	86,3	105,40	1,95
37,7	270,67	75,40	6,12	52,82	80,42	105,64	1,82
37,79	262,82	75,58	5,94	52,9	68,65	105,80	1,55
37,83	268,71	75,66	6,08	52,95	60,8	105,90	1,37
37,91	260,86	75,82	5,90	53,15	54,92	106,30	1,24
37,95	266,75	75,90	6,03	53,32	49,03	106,64	1,11
38,08	256,94	76,16	5,81	53,36	43,15	106,72	0,98
38,12	266,75	76,24	6,03	53,4	7,85	106,80	0,18
38,25	260,86	76,50	5,90	54,91	5,88	109,82	0,13
38,54	254,98	77,08	5,77	55,7	5,88	111,40	0,13
38,58	262,82	77,16	5,94				
38,71	254,98	77,42	5,77				
38,75	260,86	77,50	5,90				
38,87	254,98	77,74	5,77				
39,21	249,09	78,42	5,63				
39,25	256,94	78,50	5,81				
39,33	251,05	78,66	5,68				
39,54	245,17	79,08	5,54				
39,62	251,05	79,24	5,68				
39,71	241,25	79,42	5,46				
39,96	235,36	79,92	5,32				
40	243,21	80,00	5,50				
40,21	237,32	80,42	5,37				
40,58	229,48	81,16	5,19				



**Figura 3:** Curva tensão-deformação para o corpo de prova CP 3

**Tabela 4:** Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio do corpo de prova CP 4

Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)	Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)
0	66,69	0,00	0,00	2,75	521,72	5,50	12,07
0,04	78,45	0,08	1,81	2,83	527,61	5,66	12,20
0,08	92,18	0,16	2,13	2,92	535,45	5,84	12,39
0,12	103,95	0,24	2,40	3	543,3	6,00	12,57
0,16	115,72	0,32	2,68	3,09	549,18	6,18	12,70
0,2	125,53	0,40	2,90	3,17	555,07	6,34	12,84
0,25	137,3	0,50	3,18	3,25	562,91	6,50	13,02
0,29	147,1	0,58	3,40	3,34	568,79	6,68	13,16
0,33	156,91	0,66	3,63	3,55	576,64	7,10	13,34
0,37	168,68	0,74	3,90	3,63	582,52	7,26	13,47
0,41	176,52	0,82	4,08	3,75	588,41	7,50	13,61
0,45	186,33	0,90	4,31	3,92	598,22	7,84	13,84
0,5	196,14	1,00	4,54	4,01	606,06	8,02	14,02
0,54	205,94	1,08	4,76	4,09	611,94	8,18	14,16
0,58	213,79	1,16	4,95	4,21	617,83	8,42	14,29
0,62	223,6	1,24	5,17	4,3	623,71	8,60	14,43
0,66	231,44	1,32	5,35	4,42	629,6	8,84	14,56
0,71	239,29	1,42	5,54	4,51	635,48	9,02	14,70
0,75	249,09	1,50	5,76	4,59	641,37	9,18	14,84
0,79	256,94	1,58	5,94	4,67	647,25	9,34	14,97
0,83	266,75	1,66	6,17	4,8	653,13	9,60	15,11
0,87	274,59	1,74	6,35	4,92	659,02	9,84	15,24
0,91	280,47	1,82	6,49	5,09	664,9	10,18	15,38
0,96	288,32	1,92	6,67	5,17	672,75	10,34	15,56
1	294,2	2,00	6,81	5,38	678,63	10,76	15,70
1,04	302,05	2,08	6,99	5,55	684,51	11,10	15,83
1,08	309,9	2,16	7,17	5,67	690,4	11,34	15,97
1,12	317,74	2,24	7,35	5,84	696,28	11,68	16,11
1,16	323,62	2,32	7,49	6,01	702,17	12,02	16,24
1,21	329,51	2,42	7,62	6,3	708,05	12,60	16,38
1,25	337,35	2,50	7,80	6,38	696,28	12,76	16,11
1,29	345,2	2,58	7,99	6,43	708,05	12,86	16,38
1,33	353,04	2,66	8,17	6,47	715,9	12,94	16,56
1,37	358,93	2,74	8,30	6,76	721,78	13,52	16,70
1,41	364,81	2,82	8,44	7,01	727,66	14,02	16,83
1,46	370,7	2,92	8,58	7,35	733,55	14,70	16,97
1,5	376,58	3,00	8,71	7,76	739,43	15,52	17,10
1,54	384,43	3,08	8,89	8,51	725,7	17,02	16,79
1,58	390,31	3,16	9,03	8,56	731,59	17,12	16,92
1,67	400,12	3,34	9,26	8,6	739,43	17,20	17,10
1,71	406	3,42	9,39	9,18	747,28	18,36	17,29
1,75	411,89	3,50	9,53	10,23	741,39	20,46	17,15
1,79	417,77	3,58	9,66	10,27	751,2	20,54	17,38
1,83	423,65	3,66	9,80	11,19	743,36	22,38	17,20
1,92	435,42	3,84	10,07	11,27	755,12	22,54	17,47
1,96	441,31	3,92	10,21	12,15	749,24	24,30	17,33
2,04	449,15	4,08	10,39	12,73	743,36	25,46	17,20
2,13	457	4,26	10,57	12,77	713,94	25,54	16,51
2,21	466,8	4,42	10,80	12,81	737,47	25,62	17,06
2,29	476,61	4,58	11,02	12,86	747,28	25,72	17,29
2,38	486,42	4,76	11,25	13,36	741,39	26,72	17,15
2,46	494,26	4,92	11,43	13,57	735,51	27,14	17,01
2,54	502,11	5,08	11,61	13,61	741,39	27,22	17,15
2,59	507,99	5,18	11,75	13,86	717,86	27,72	16,61
2,67	513,88	5,34	11,89	13,9	733,55	27,80	16,97

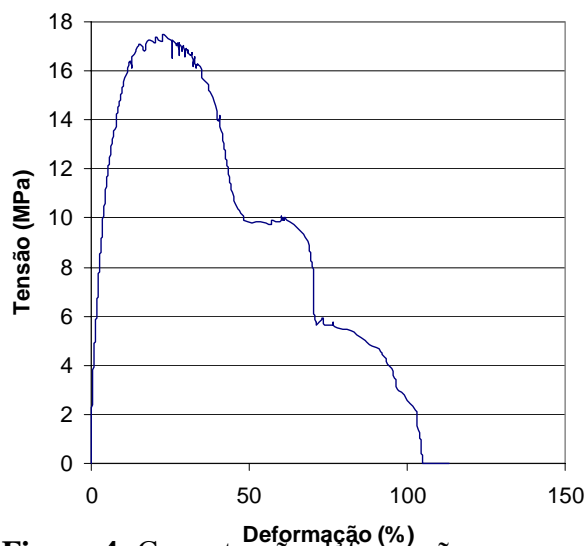
**Tabela 4:** Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio do corpo de prova CP 4  
Continuação

Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)	Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)
13,98	741,39	27,96	17,15	22,84	458,96	45,68	10,62
14,36	731,59	28,72	16,92	23	453,07	46,00	10,48
14,4	725,7	28,80	16,79	23,34	447,19	46,68	10,34
14,53	735,51	29,06	17,01	23,59	441,31	47,18	10,21
14,73	715,9	29,46	16,56	24,01	435,42	48,02	10,07
14,78	725,7	29,56	16,79	24,21	429,54	48,42	9,94
14,94	731,59	29,88	16,92	25,34	423,65	50,68	9,80
15,24	723,74	30,48	16,74	26,85	425,62	53,70	9,85
15,28	729,63	30,56	16,88	28,35	421,69	56,70	9,75
15,36	723,74	30,72	16,74	28,43	427,58	56,86	9,89
15,74	717,86	31,48	16,61	29,93	425,62	59,86	9,85
15,82	723,74	31,64	16,74	30,1	435,42	60,20	10,07
16,03	717,86	32,06	16,61	30,27	427,58	60,54	9,89
16,2	711,97	32,40	16,47	30,52	433,46	61,04	10,03
16,24	700,21	32,48	16,20	30,6	427,58	61,20	9,89
16,28	715,9	32,56	16,56	30,73	433,46	61,46	10,03
16,45	710,01	32,90	16,42	30,9	427,58	61,80	9,89
16,53	702,17	33,06	16,24	32,02	421,69	64,04	9,75
16,57	696,28	33,14	16,11	32,44	415,81	64,88	9,62
16,74	704,13	33,48	16,29	33,28	409,92	66,56	9,48
17,24	698,24	34,48	16,15	33,53	404,04	67,06	9,35
17,37	686,48	34,74	15,88	33,9	398,16	67,80	9,21
17,49	680,59	34,98	15,74	34,24	392,27	68,48	9,07
17,99	674,71	35,98	15,61	34,45	384,43	68,90	8,89
18,29	668,82	36,58	15,47	34,61	376,58	69,22	8,71
18,49	662,94	36,98	15,34	34,74	370,7	69,48	8,58
18,62	657,06	37,24	15,20	34,82	362,85	69,64	8,39
18,99	651,17	37,98	15,06	34,95	355,01	69,90	8,21
19,2	645,29	38,40	14,93	35,03	349,12	70,06	8,08
19,37	637,44	38,74	14,75	35,11	341,28	70,22	7,89
19,58	629,6	39,16	14,56	35,2	329,51	70,40	7,62
19,91	619,79	39,82	14,34	35,24	282,44	70,48	6,53
20	609,98	40,00	14,11	35,28	268,71	70,56	6,22
20,21	604,1	40,42	13,97	35,32	260,86	70,64	6,03
20,29	611,94	40,58	14,16	35,41	254,98	70,82	5,90
20,37	602,14	40,74	13,93	35,53	249,09	71,06	5,76
20,46	592,33	40,92	13,70	35,66	243,21	71,32	5,63
20,62	586,45	41,24	13,57	35,99	249,09	71,98	5,76
20,71	576,64	41,42	13,34	36,7	254,98	73,40	5,90
20,87	570,76	41,74	13,20	36,74	247,13	73,48	5,72
21	564,87	42,00	13,07	38,25	243,21	76,50	5,63
21,08	557,03	42,16	12,89	38,29	249,09	76,58	5,76
21,17	551,14	42,34	12,75	38,37	243,21	76,74	5,63
21,33	541,34	42,66	12,52	39,75	237,32	79,50	5,49
21,42	533,49	42,84	12,34	41,25	233,4	82,50	5,40
21,54	527,61	43,08	12,20	41,96	227,52	83,92	5,26
21,63	521,72	43,26	12,07	42,76	221,63	85,52	5,13
21,75	513,88	43,50	11,89	43,38	215,75	86,76	4,99
21,88	506,03	43,76	11,71	43,97	209,87	87,94	4,85
21,96	498,19	43,92	11,52	45,05	203,98	90,10	4,72
22,09	492,3	44,18	11,39	45,85	198,1	91,70	4,58
22,21	486,42	44,42	11,25	46,1	192,21	92,20	4,45
22,34	478,57	44,68	11,07	46,39	186,33	92,78	4,31
22,46	470,73	44,92	10,89	46,76	180,45	93,52	4,17
22,67	464,84	45,34	10,75	47,01	174,56	94,02	4,04



**Tabela 4:** Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio do corpo de prova CP 4  
Continuação

Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)
47,39	168,68	94,78	3,90
47,68	162,79	95,36	3,77
47,89	154,95	95,78	3,58
48,06	149,06	96,12	3,45
48,14	143,18	96,28	3,31
48,23	137,3	96,46	3,18
48,56	131,41	97,12	3,04
49,1	125,53	98,20	2,90
49,52	119,64	99,04	2,77
49,9	111,8	99,80	2,59
50,44	105,91	100,88	2,45
50,81	100,03	101,62	2,31
51,36	94,15	102,72	2,18
51,53	86,3	103,06	2,00
51,61	74,53	103,22	1,72
51,65	66,69	103,30	1,54
51,73	58,84	103,46	1,36
51,9	52,96	103,80	1,23
52,07	47,07	104,14	1,09
52,15	41,19	104,30	0,95
52,19	19,61	104,38	0,45
52,36	13,73	104,72	0,32
52,49	0	104,98	0,00
53,99	0	107,98	0,00
55,49	0	110,98	0,00
56,58	0	113,16	0,00



**Figura 4:** Curva tensão-deformação para o corpo de prova CP 4

**Tabela 5:** Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio do corpo de prova CP 5

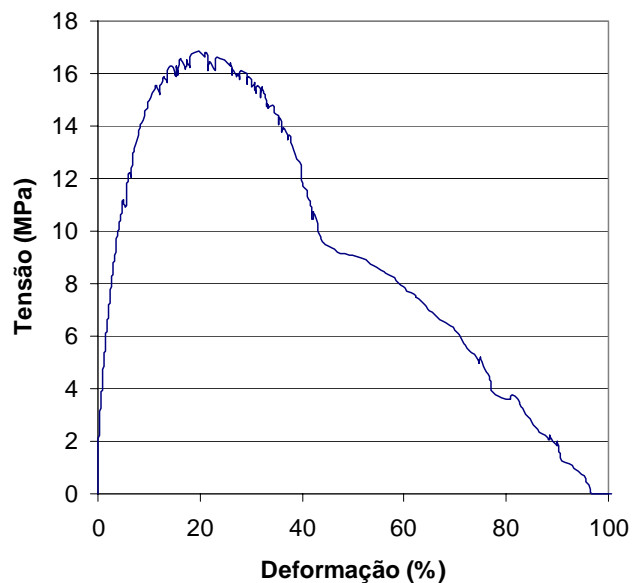
Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)	Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)
0	70,61	0,00	0,00	2,8	507,99	5,60	11,71
0,04	84,34	0,08	1,94	2,88	515,84	5,76	11,89
0,08	96,11	0,16	2,21	2,96	523,68	5,92	12,07
0,12	107,87	0,24	2,49	3,05	529,57	6,10	12,20
0,16	119,64	0,32	2,76	3,21	523,68	6,42	12,07
0,21	129,45	0,42	2,98	3,3	533,49	6,60	12,29
0,25	141,22	0,50	3,25	3,34	543,3	6,68	12,52
0,29	151,02	0,58	3,48	3,42	557,03	6,84	12,84
0,33	162,79	0,66	3,75	3,51	564,87	7,02	13,02
0,37	170,64	0,74	3,93	3,59	570,76	7,18	13,15
0,42	180,45	0,84	4,16	3,72	578,6	7,44	13,33
0,46	192,21	0,92	4,43	3,84	586,45	7,68	13,51
0,5	200,06	1,00	4,61	3,92	592,33	7,84	13,65
0,54	209,87	1,08	4,84	4,05	600,18	8,10	13,83
0,58	217,71	1,16	5,02	4,17	606,06	8,34	13,97
0,62	227,52	1,24	5,24	4,26	611,94	8,52	14,10
0,67	235,36	1,34	5,42	4,38	617,83	8,76	14,24
0,71	243,21	1,42	5,60	4,51	625,67	9,02	14,42
0,75	251,05	1,50	5,79	4,63	631,56	9,26	14,55
0,79	260,86	1,58	6,01	4,8	637,44	9,60	14,69
0,83	268,71	1,66	6,19	4,92	643,33	9,84	14,82
0,88	274,59	1,76	6,33	5,05	649,21	10,10	14,96
0,92	282,44	1,84	6,51	5,18	655,09	10,36	15,10
0,96	290,28	1,92	6,69	5,38	662,94	10,76	15,28
1	296,17	2,00	6,82	5,59	668,82	11,18	15,41
1,04	304,01	2,08	7,01	5,8	674,71	11,60	15,55
1,08	309,9	2,16	7,14	6,01	659,02	12,02	15,19
1,13	315,78	2,26	7,28	6,05	670,79	12,10	15,46
1,17	321,66	2,34	7,41	6,18	676,67	12,36	15,59
1,21	329,51	2,42	7,59	6,3	682,55	12,60	15,73
1,25	335,39	2,50	7,73	6,47	688,44	12,94	15,86
1,29	341,28	2,58	7,86	6,72	678,63	13,44	15,64
1,33	349,12	2,66	8,05	6,8	690,4	13,60	15,91
1,38	355,01	2,76	8,18	6,85	698,24	13,70	16,09
1,42	360,89	2,84	8,32	7,22	706,09	14,44	16,27
1,46	366,77	2,92	8,45	7,6	690,4	15,20	15,91
1,5	372,66	3,00	8,59	7,64	706,09	15,28	16,27
1,54	378,54	3,08	8,72	7,81	698,24	15,62	16,09
1,58	384,43	3,16	8,86	7,85	692,36	15,70	15,95
1,67	392,27	3,34	9,04	7,97	713,94	15,94	16,45
1,71	398,16	3,42	9,18	8,18	719,82	16,36	16,59
1,79	407,96	3,58	9,40	8,48	710,01	16,96	16,36
1,84	415,81	3,68	9,58	8,52	702,17	17,04	16,18
1,92	425,62	3,84	9,81	8,64	711,97	17,28	16,41
1,96	431,5	3,92	9,94	8,73	717,86	17,46	16,54
2	437,38	4,00	10,08	8,98	704,13	17,96	16,23
2,09	445,23	4,18	10,26	9,06	715,9	18,12	16,50
2,17	451,11	4,34	10,40	9,1	725,7	18,20	16,72
2,25	458,96	4,50	10,58	9,81	731,59	19,62	16,86
2,3	464,84	4,60	10,71	10,4	721,78	20,80	16,63
2,38	472,69	4,76	10,89	10,44	729,63	20,88	16,81
2,42	478,57	4,84	11,03	10,73	723,74	21,46	16,68
2,5	486,42	5,00	11,21	10,77	700,21	21,54	16,14
2,67	474,65	5,34	10,94	10,98	713,94	21,96	16,45
2,75	482,49	5,50	11,12	11,48	698,24	22,96	16,09

**Tabela 5:** Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio do corpo de prova CP 5  
Continuação

Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)	Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)
11,52	713,94	23,04	16,45	19,75	547,22	39,50	12,61
11,61	721,78	23,22	16,63	19,87	537,41	39,74	12,38
12,44	715,9	24,88	16,50	19,96	527,61	39,92	12,16
12,94	706,09	25,88	16,27	20,12	511,92	40,24	11,80
12,98	711,97	25,96	16,41	20,25	506,03	40,50	11,66
13,11	704,13	26,22	16,23	20,46	500,15	40,92	11,53
13,15	692,36	26,30	15,95	20,5	490,34	41,00	11,30
13,19	702,17	26,38	16,18	20,75	484,46	41,50	11,16
13,4	694,32	26,80	16,00	20,84	478,57	41,68	11,03
13,61	688,44	27,22	15,86	20,92	472,69	41,84	10,89
13,78	694,32	27,56	16,00	20,96	458,96	41,92	10,58
13,82	684,51	27,64	15,77	21,08	453,07	42,16	10,44
13,86	694,32	27,72	16,00	21,13	466,8	42,26	10,76
13,99	700,21	27,98	16,14	21,25	460,92	42,50	10,62
14,53	694,32	29,06	16,00	21,38	453,07	42,76	10,44
14,57	688,44	29,14	15,86	21,5	441,31	43,00	10,17
14,61	676,67	29,22	15,59	21,54	435,42	43,08	10,03
14,65	682,55	29,30	15,73	21,75	429,54	43,50	9,90
14,82	690,4	29,64	15,91	21,8	423,65	43,60	9,76
14,99	684,51	29,98	15,77	22,05	417,77	44,10	9,63
15,07	672,75	30,14	15,50	22,34	411,89	44,68	9,49
15,28	678,63	30,56	15,64	22,8	406	45,60	9,36
15,41	672,75	30,82	15,50	23,38	400,12	46,76	9,22
15,45	660,98	30,90	15,23	24,88	394,23	49,76	9,08
15,49	668,82	30,98	15,41	25,8	388,35	51,60	8,95
15,66	674,71	31,32	15,55	26,56	382,47	53,12	8,81
15,95	668,82	31,90	15,41	27,06	376,58	54,12	8,68
15,99	655,09	31,98	15,10	27,72	370,7	55,44	8,54
16,03	670,79	32,06	15,46	28,18	364,81	56,36	8,41
16,28	664,9	32,56	15,32	28,73	358,93	57,46	8,27
16,32	659,02	32,64	15,19	29,14	353,04	58,28	8,14
16,49	639,4	32,98	14,73	29,52	347,16	59,04	8,00
16,58	645,29	33,16	14,87	29,9	341,28	59,80	7,86
16,62	637,44	33,24	14,69	30,19	335,39	60,38	7,73
16,66	643,33	33,32	14,82	30,94	329,51	61,88	7,59
16,7	637,44	33,40	14,69	31,19	323,62	62,38	7,46
17,08	643,33	34,16	14,82	31,69	317,74	63,38	7,32
17,2	637,44	34,40	14,69	32,07	311,86	64,14	7,19
17,28	629,6	34,56	14,51	32,36	305,97	64,72	7,05
17,66	623,71	35,32	14,37	32,69	300,09	65,38	6,92
17,7	609,98	35,40	14,06	33,07	294,2	66,14	6,78
17,74	621,75	35,48	14,33	33,53	288,32	67,06	6,64
18	613,91	36,00	14,15	34,11	282,44	68,22	6,51
18,04	598,22	36,08	13,79	34,57	276,55	69,14	6,37
18,2	604,1	36,40	13,92	34,95	270,67	69,90	6,24
18,37	598,22	36,74	13,79	35,2	264,78	70,40	6,10
18,58	592,33	37,16	13,65	35,53	258,9	71,06	5,97
18,62	584,49	37,24	13,47	35,7	253,02	71,40	5,83
18,66	592,33	37,32	13,65	35,91	247,13	71,82	5,69
18,87	586,45	37,74	13,51	36,08	241,25	72,16	5,56
18,91	580,56	37,82	13,38	36,45	235,36	72,90	5,42
19	574,68	38,00	13,24	36,87	229,48	73,74	5,29
19,16	568,79	38,32	13,11	37,16	223,6	74,32	5,15
19,29	560,95	38,58	12,93	37,37	215,75	74,74	4,97
19,41	553,1	38,82	12,75	37,41	225,56	74,82	5,20

**Tabela 5:** Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio do corpo de prova CP 5  
Continuação

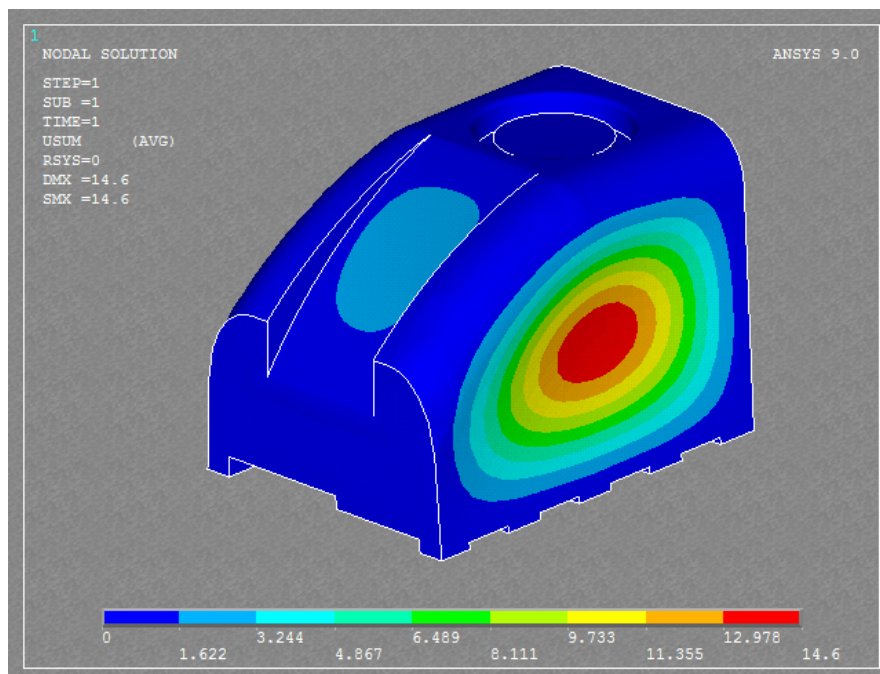
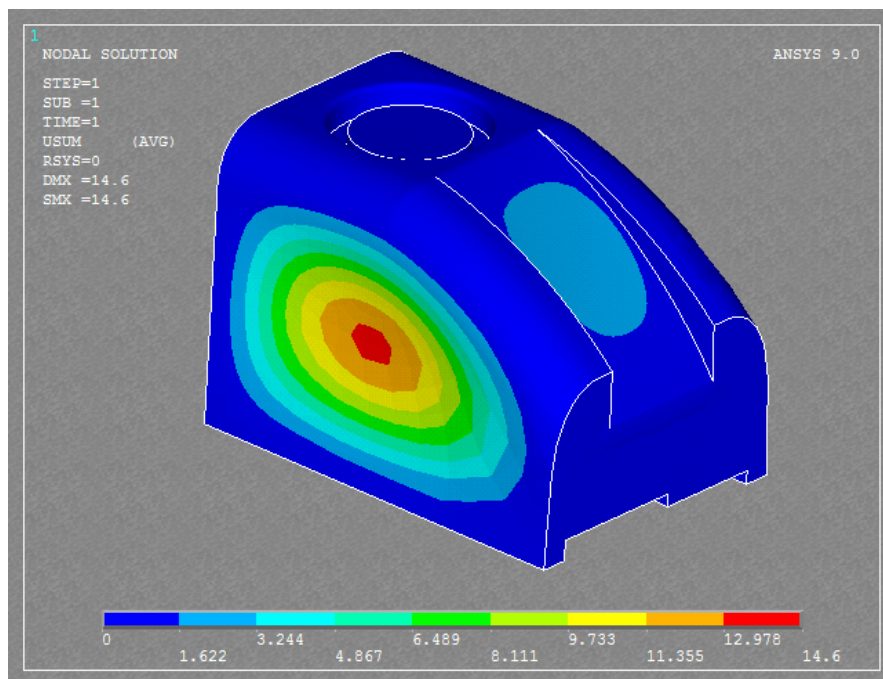
Desl. (mm)	Força (N)	Deform. (%)	Tensão (MPa)
37,58	217,71	75,16	5,02
37,75	211,83	75,50	4,88
37,87	205,94	75,74	4,75
38,04	200,06	76,08	4,61
38,37	194,17	76,74	4,47
38,5	176,52	77,00	4,07
38,58	168,68	77,16	3,89
38,88	162,79	77,76	3,75
40,21	156,91	80,42	3,62
40,63	162,79	81,26	3,75
41,17	156,91	82,34	3,62
41,26	149,06	82,52	3,43
41,42	143,18	82,84	3,30
41,67	137,3	83,34	3,16
41,88	131,41	83,76	3,03
42,22	125,53	84,44	2,89
42,42	119,64	84,84	2,76
42,63	113,76	85,26	2,62
42,92	107,87	85,84	2,49
43,22	101,99	86,44	2,35
43,76	96,11	87,52	2,21
44,18	90,22	88,36	2,08
44,3	96,11	88,60	2,21
44,51	86,3	89,02	1,99
44,93	80,42	89,86	1,85
44,97	86,3	89,94	1,99
45,14	80,42	90,28	1,85
45,18	72,57	90,36	1,67
45,22	66,69	90,44	1,54
45,3	60,8	90,60	1,40
45,47	54,92	90,94	1,27
46,22	49,03	92,44	1,13
46,64	43,15	93,28	0,99
47,06	37,27	94,12	0,86
47,39	31,38	94,78	0,72
47,73	25,5	95,46	0,59
47,81	19,61	95,62	0,45
48,02	13,73	96,04	0,32
48,23	7,85	96,46	0,18
48,35	0	96,70	0,00
49,86	0	99,72	0,00
50,28	0	100,56	0,00

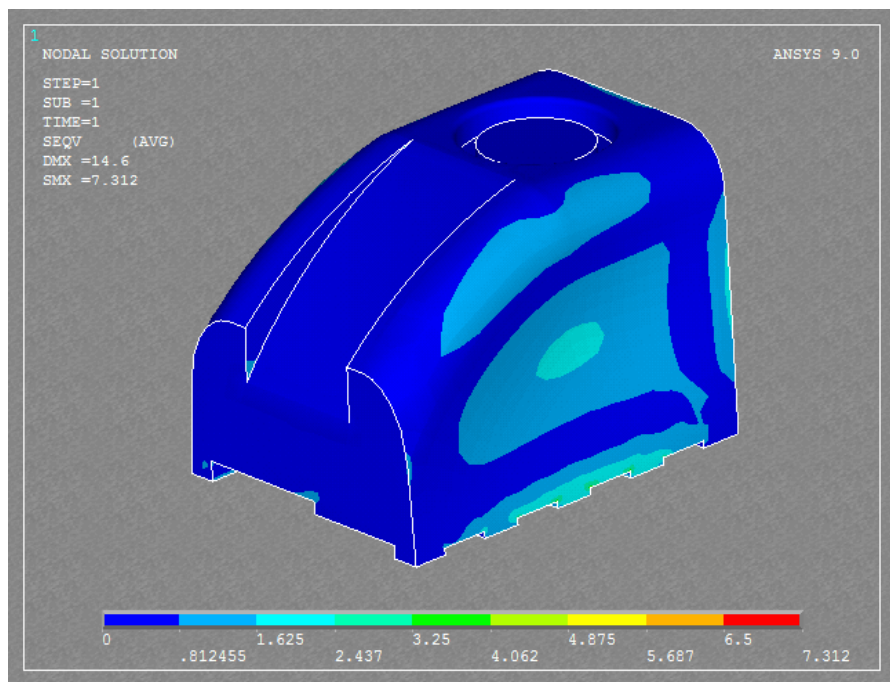


**Figura 5:** Curva tensão-deformação para o corpo de prova CP 5

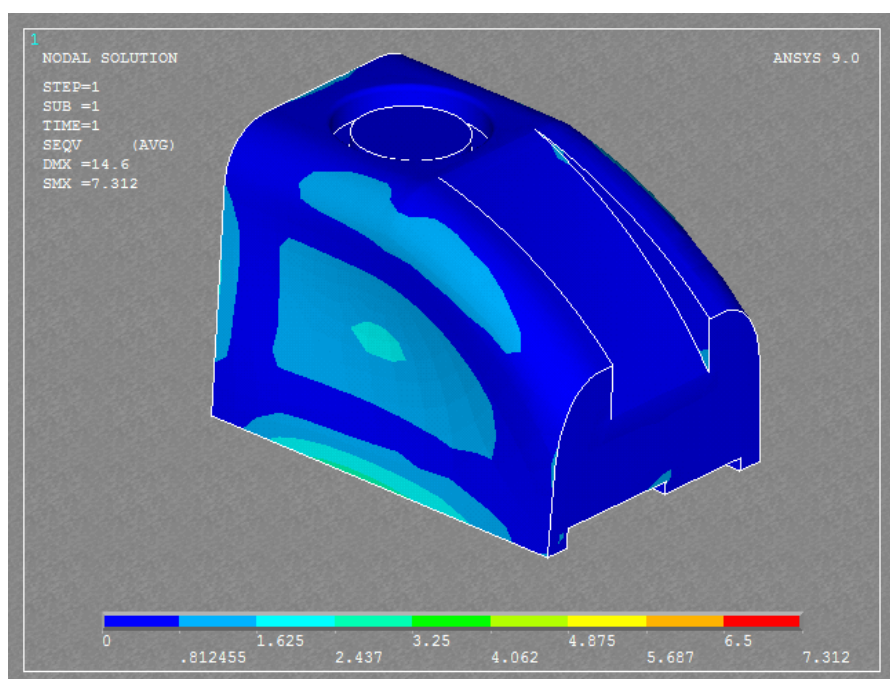
## APÊNDICE D – RESULTADOS DAS ANÁLISES POR ELEMENTOS FINITOS

## RESERVATÓRIO 1

**Figura 1: Resultados nodais, deslocamento total (USUM) – reservatório 1****Figura 2: Resultados nodais, deslocamento total (USUM) – reservatório 1**

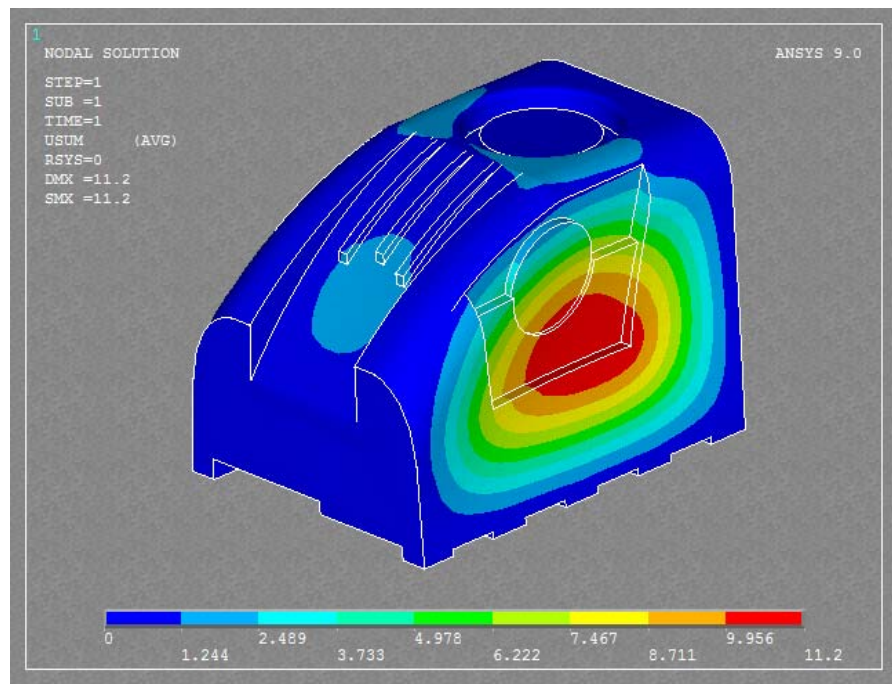


**Figura 3: Resultados nodais, tensão de Von Mises – reservatório 1**

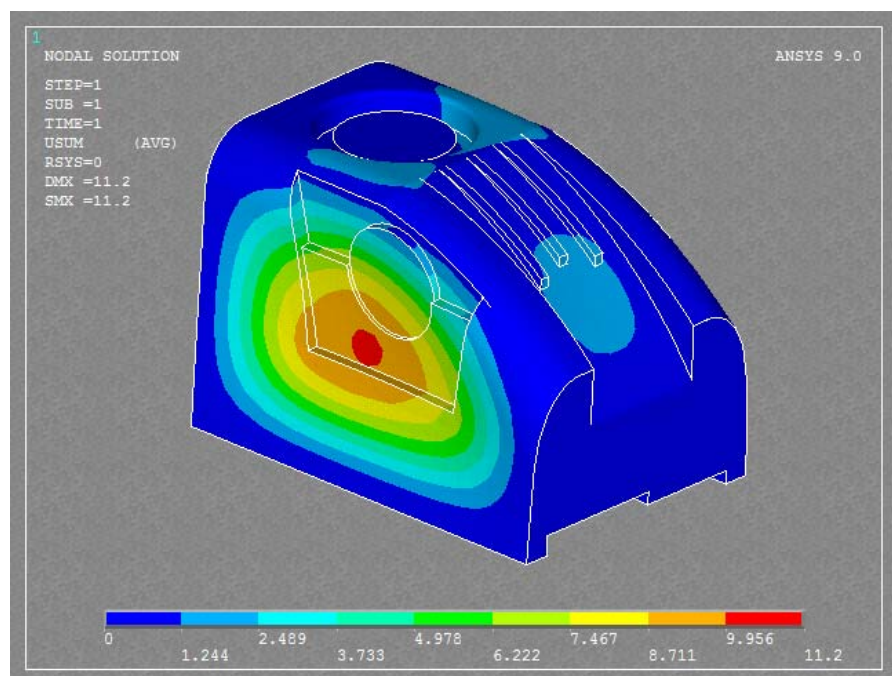


**Figura 4: Resultados nodais, tensão de Von Mises – reservatório 1**

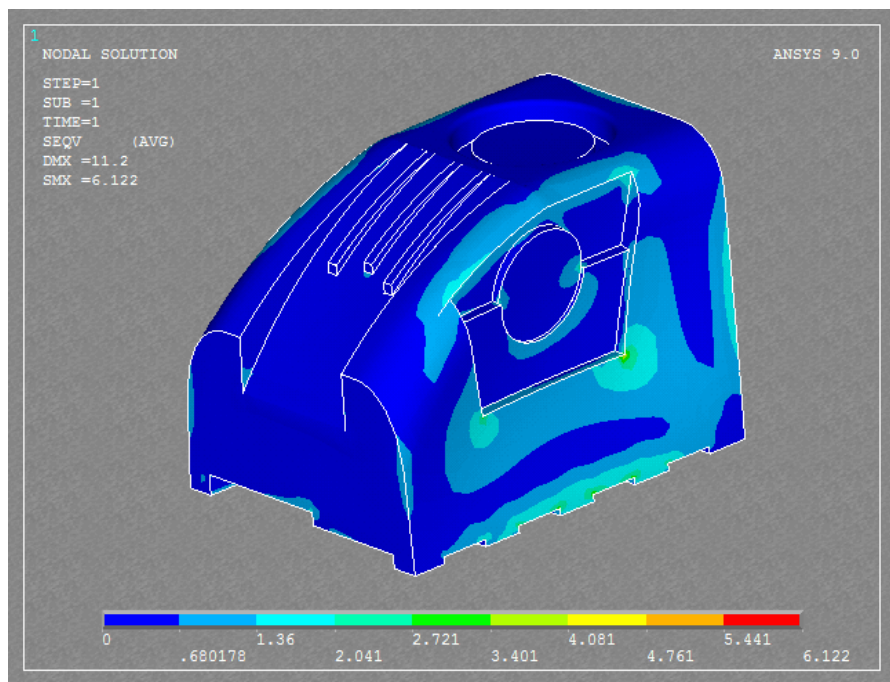
## RESERVATÓRIO 2



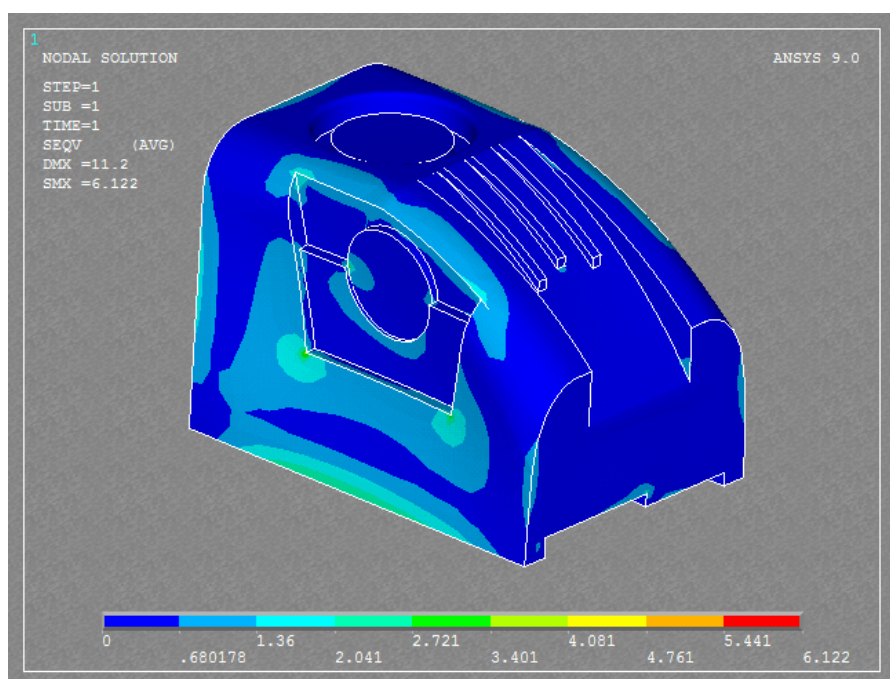
**Figura 5: Resultados nodais, deslocamento total (USUM) – reservatório 2**



**Figura 6: Resultados nodais, deslocamento total (USUM) – reservatório 2**



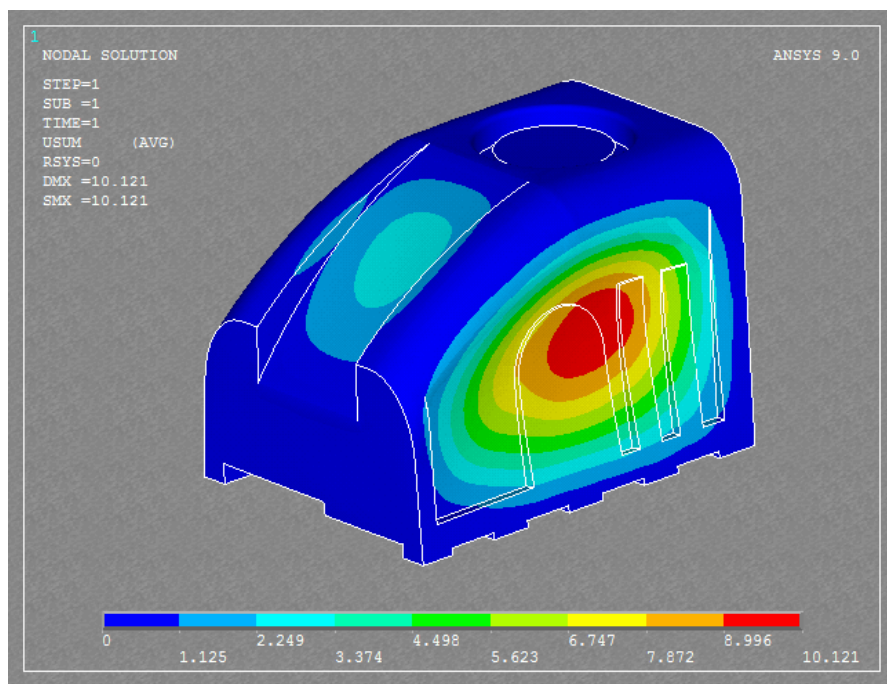
**Figura 7: Resultados nodais, tensão de Von Mises – reservatório 2**



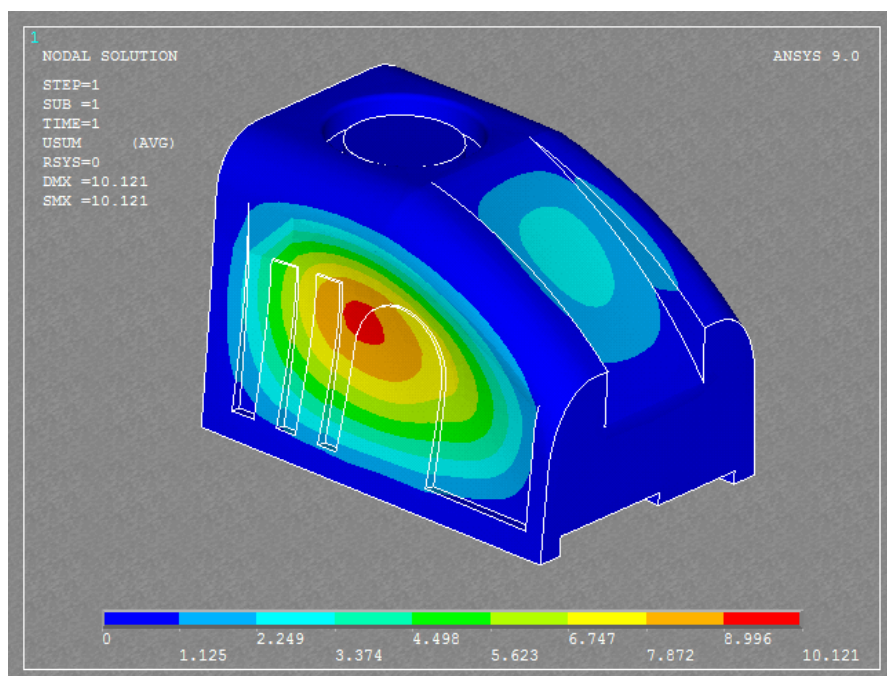
**Figura 8: Resultados nodais, tensão de Von Mises – reservatório 2**



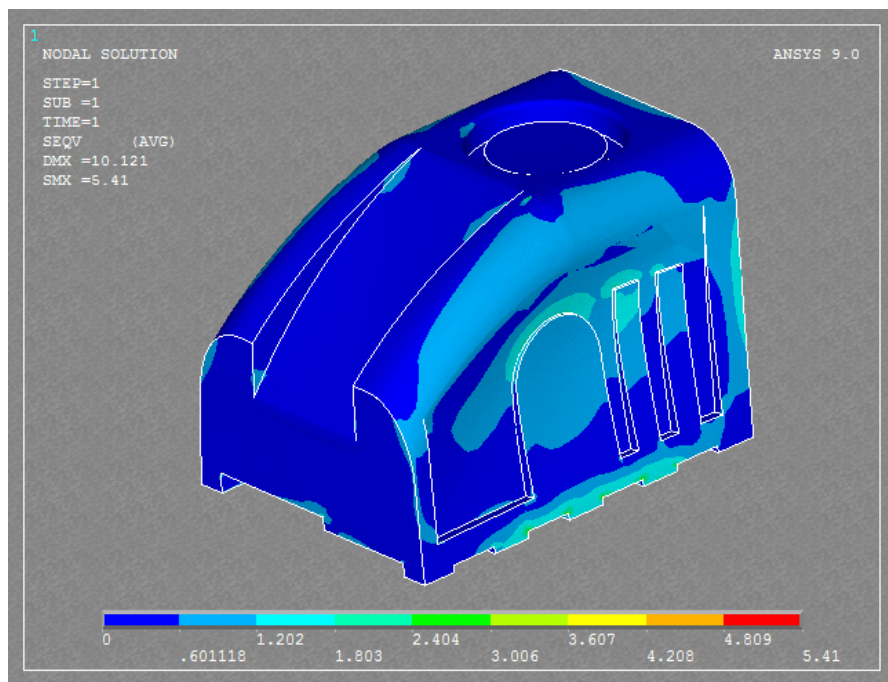
## RESERVATÓRIO 3



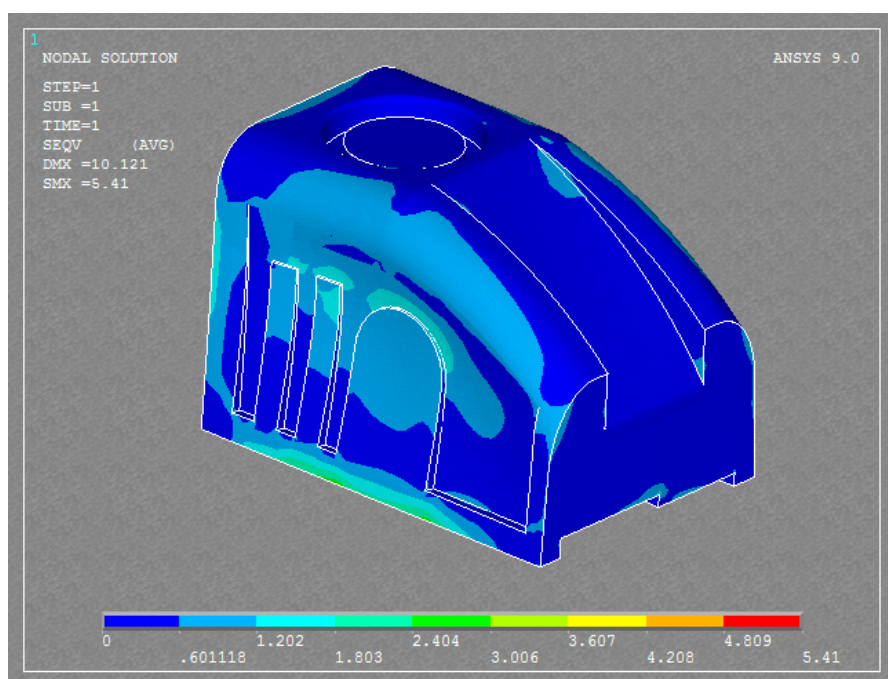
**Figura 9: Resultados nodais, deslocamento total (USUM) – reservatório 3**



**Figura 10: Resultados nodais, deslocamento total (USUM) – reservatório 3**



**Figura 11: Resultados nodais, tensão de Von Mises – reservatório 3**



**Figura 12: Resultados nodais, tensão de Von Mises – reservatório 3**

## RESERVATÓRIO 4

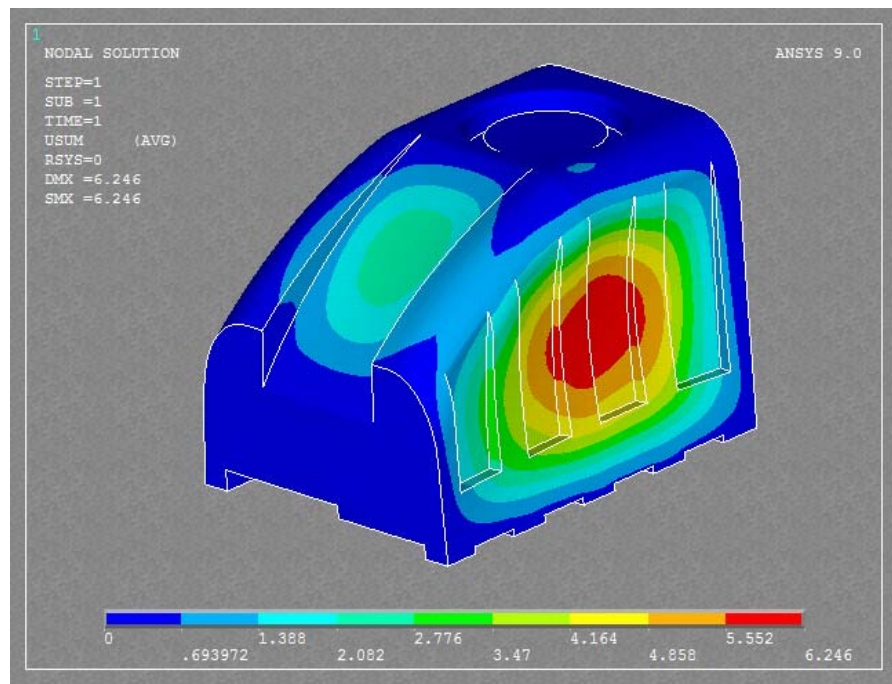


Figura 13: Resultados nodais, deslocamento total (USUM) – reservatório 4

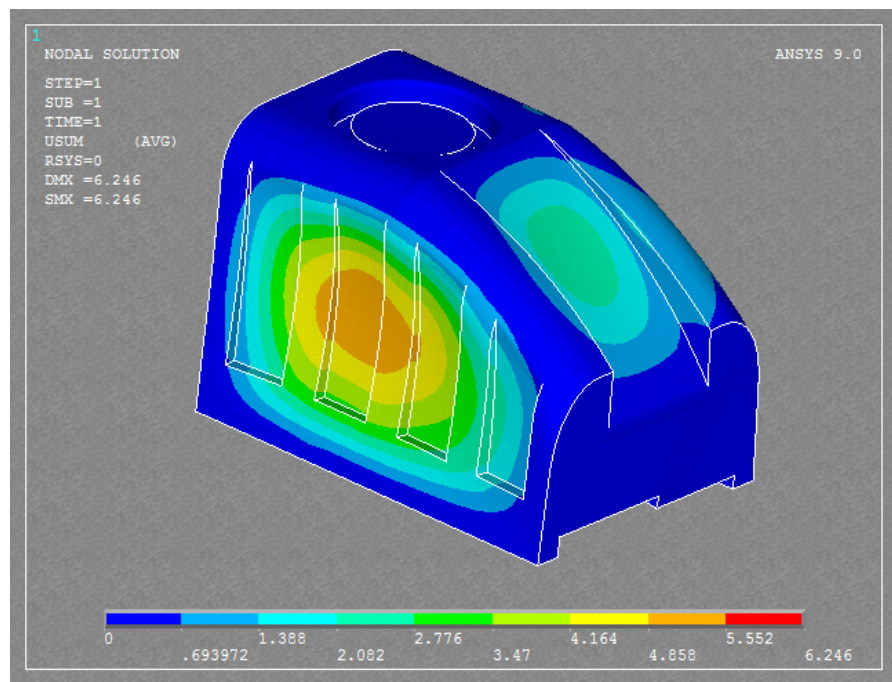
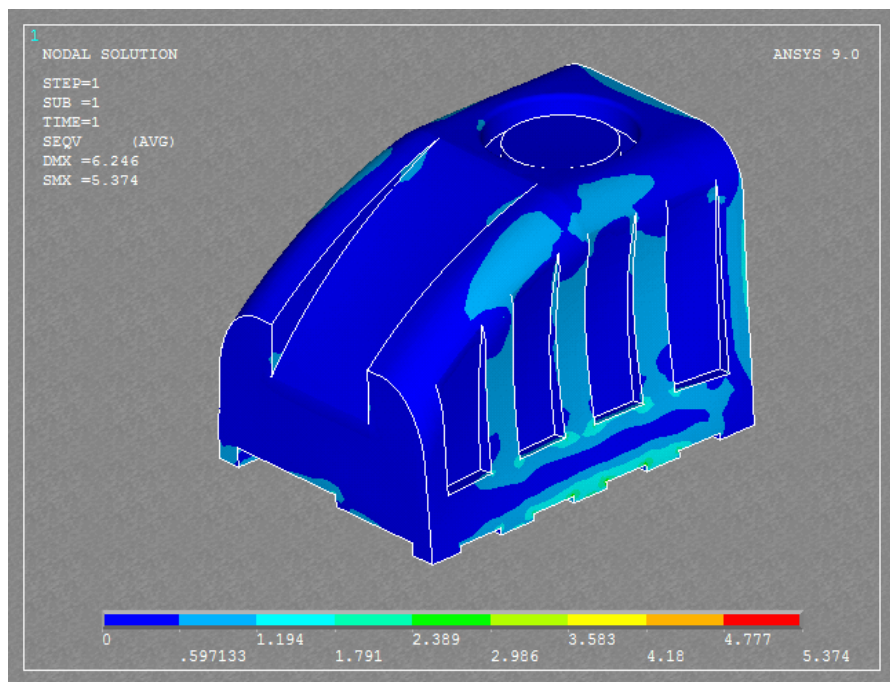
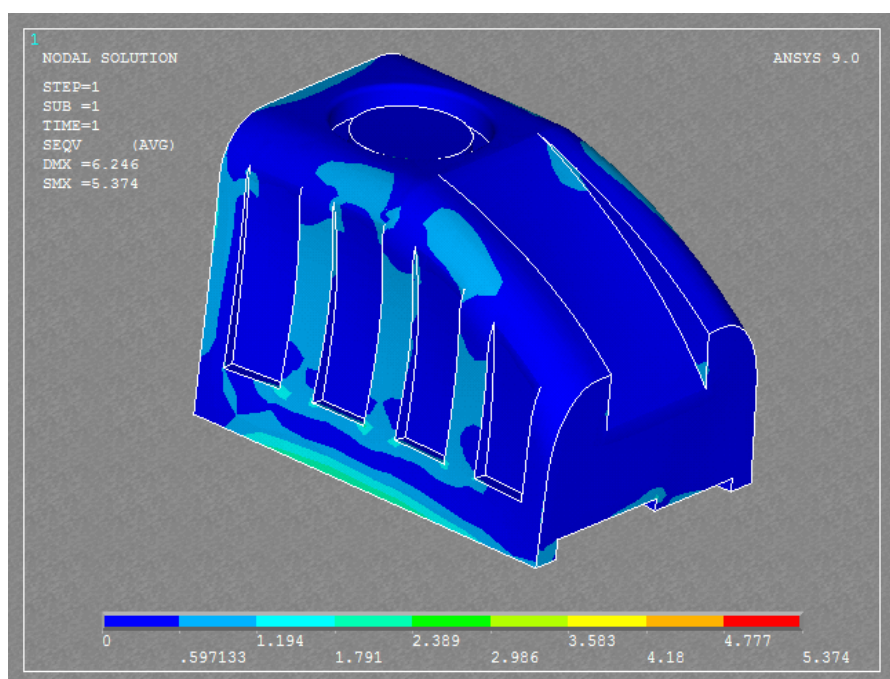


Figura 14: Resultados nodais, deslocamento total (USUM) – reservatório 4



**Figura 15: Resultados nodais, tensão de Von Mises – reservatório 4**



**Figura 16: Resultados nodais, tensão de Von Mises – reservatório 4**

## RESERVATÓRIO 5

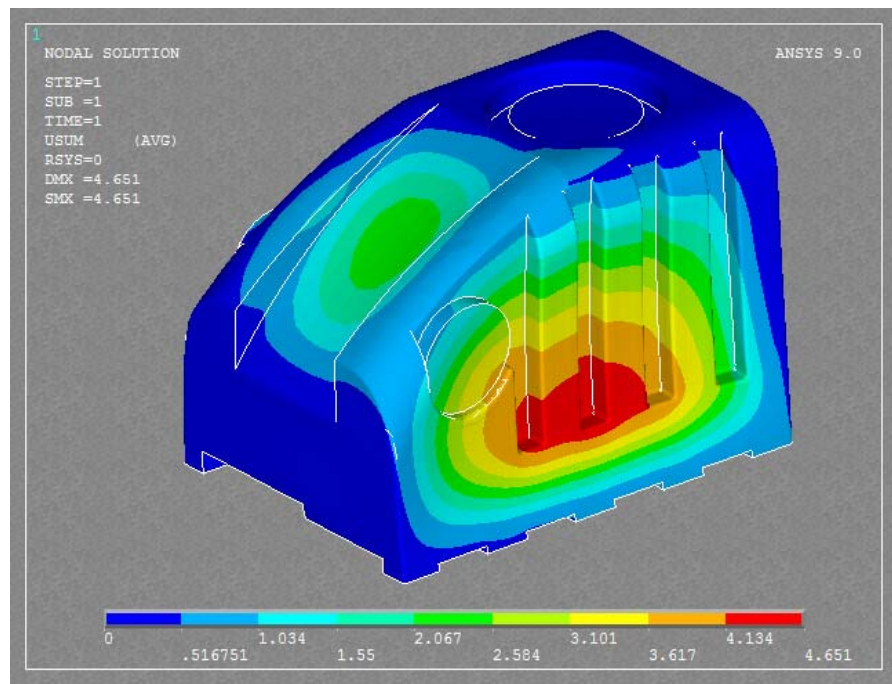


Figura 17: Resultados nodais, deslocamento total (USUM) – reservatório 5

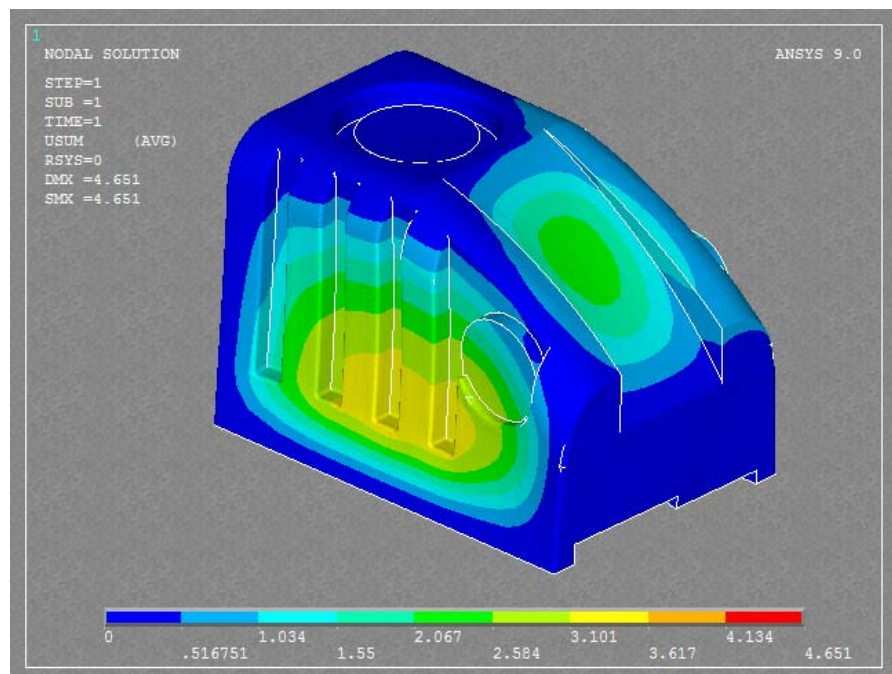
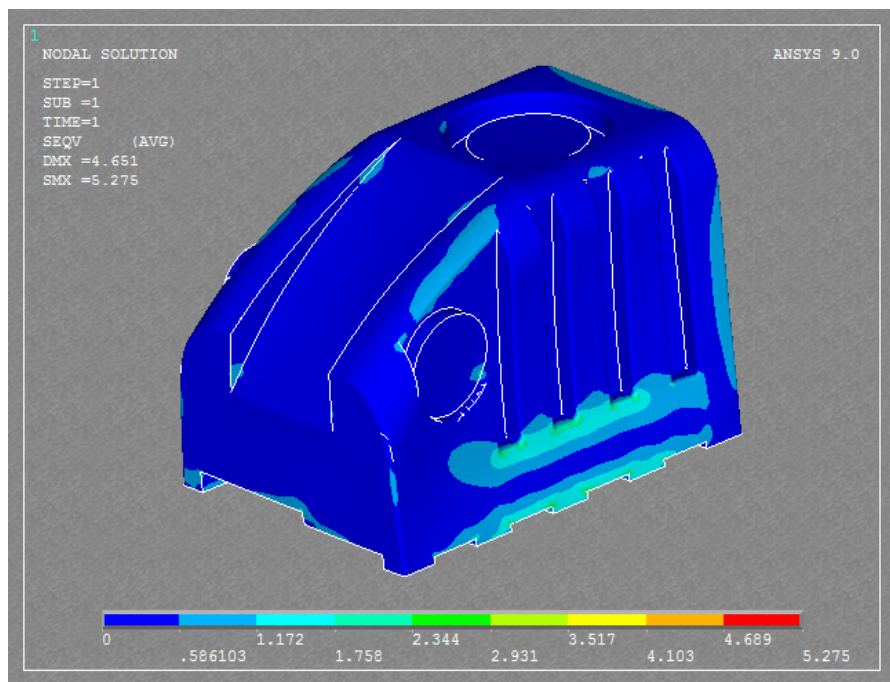
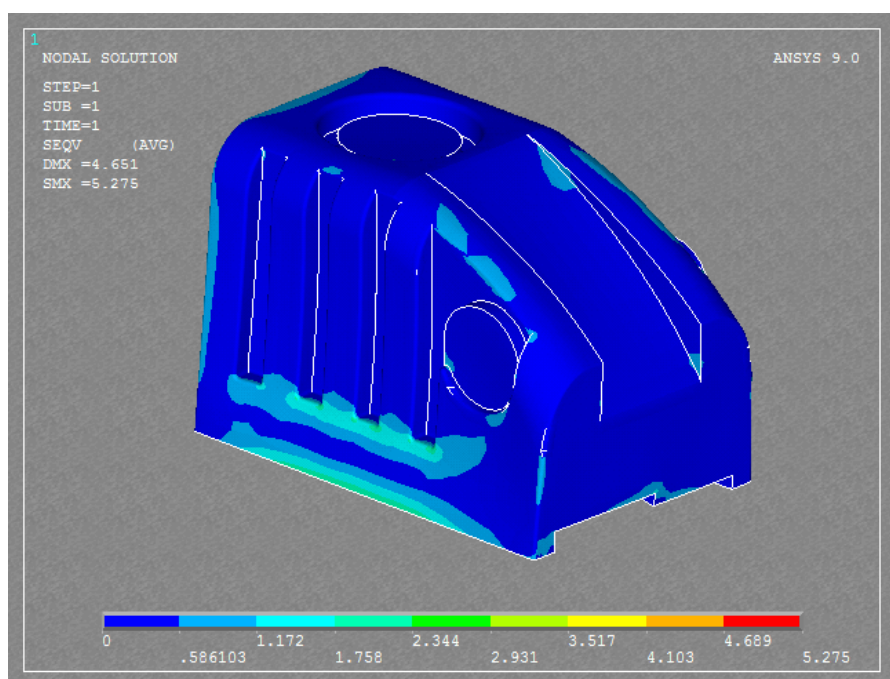


Figura 18: Resultados nodais, deslocamento total (USUM) – reservatório 5

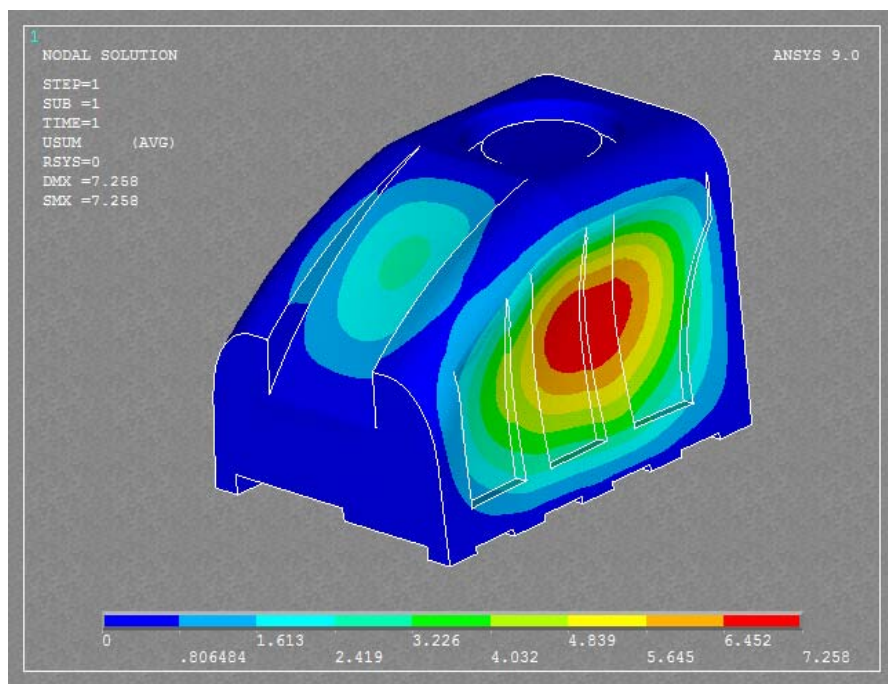


**Figura 19: Resultados nodais, tensão de Von Mises – reservatório 5**

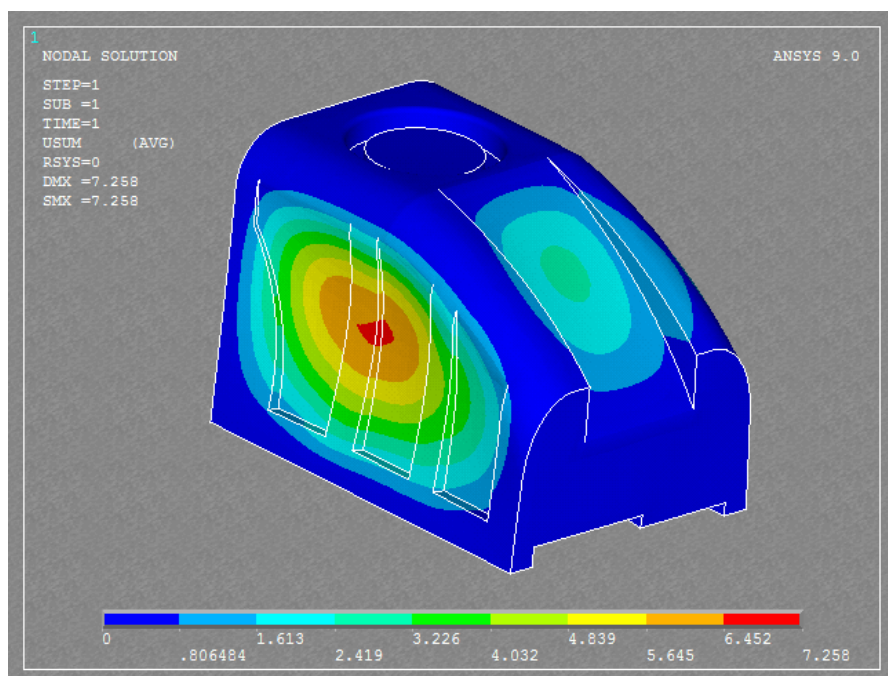


**Figura 20: Resultados nodais, tensão de Von Mises – reservatório 5**

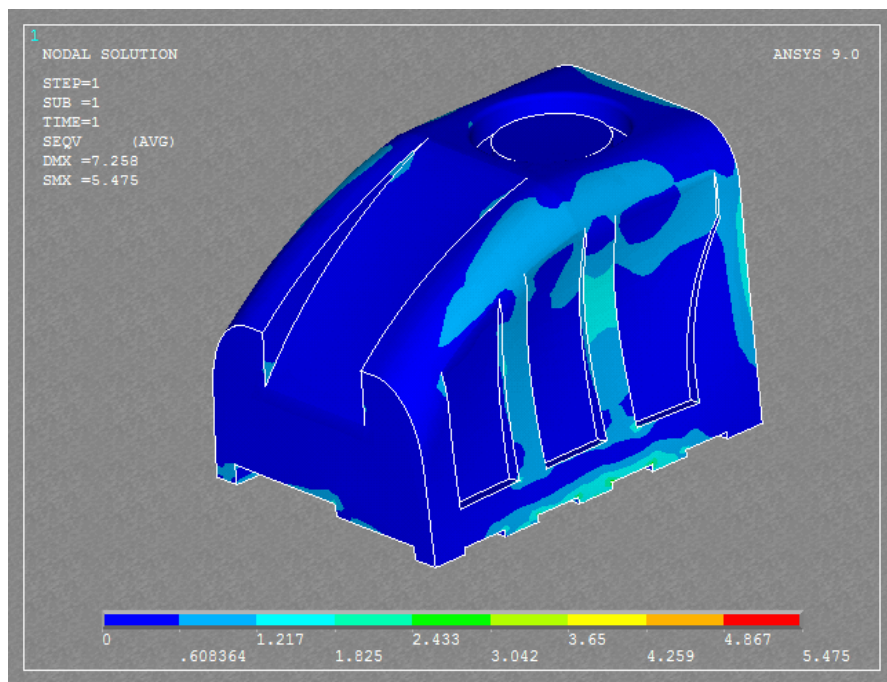
## RESERVATÓRIO 6



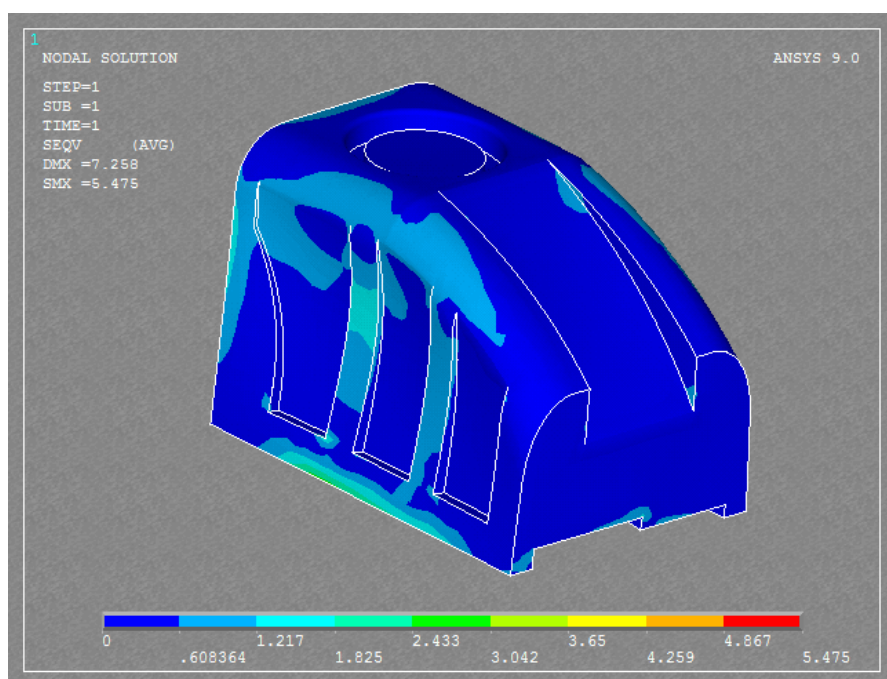
**Figura 21: Resultados nodais, deslocamento total (USUM) – reservatório 6**



**Figura 22: Resultados nodais, deslocamento total (USUM) – reservatório 6**



**Figura 23: Resultados nodais, tensão de Von Mises – reservatório 6**



**Figura 24: Resultados nodais, tensão de Von Mises – reservatório 6**



## RESERVATÓRIO 7 –

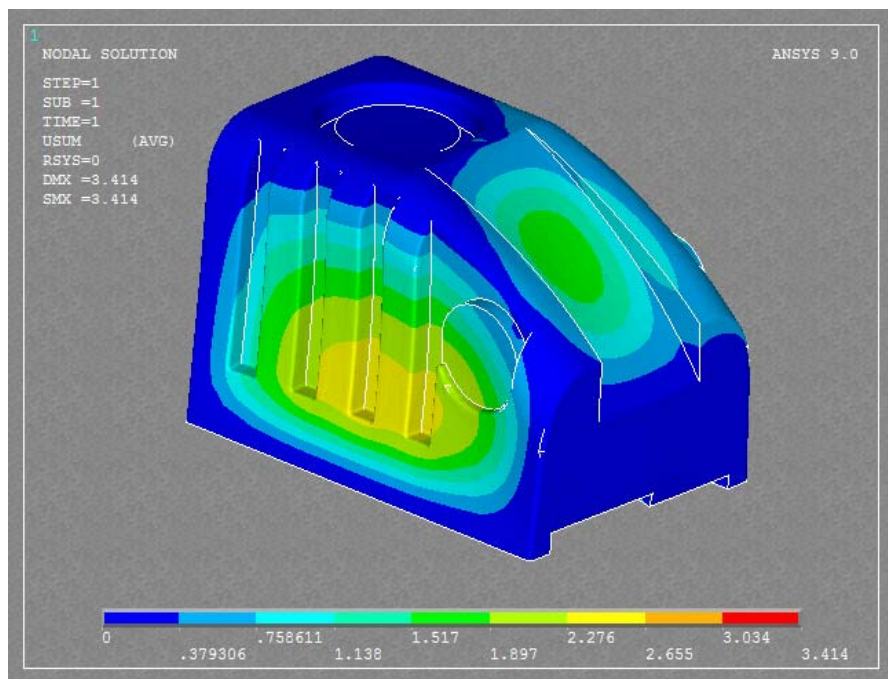


Figura 25: Resultados nodais, deslocamento total (USUM) – reservatório 7

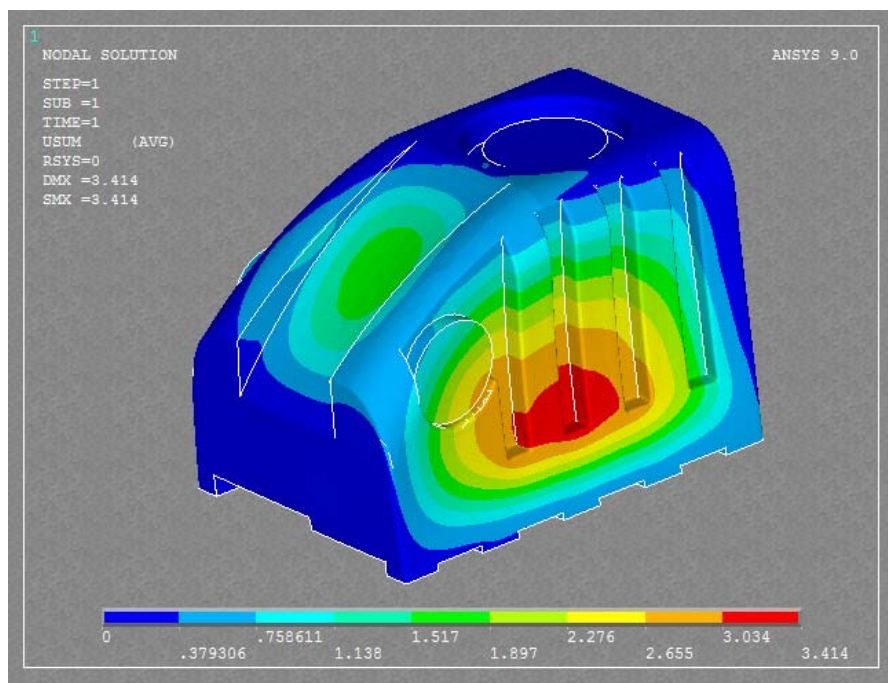
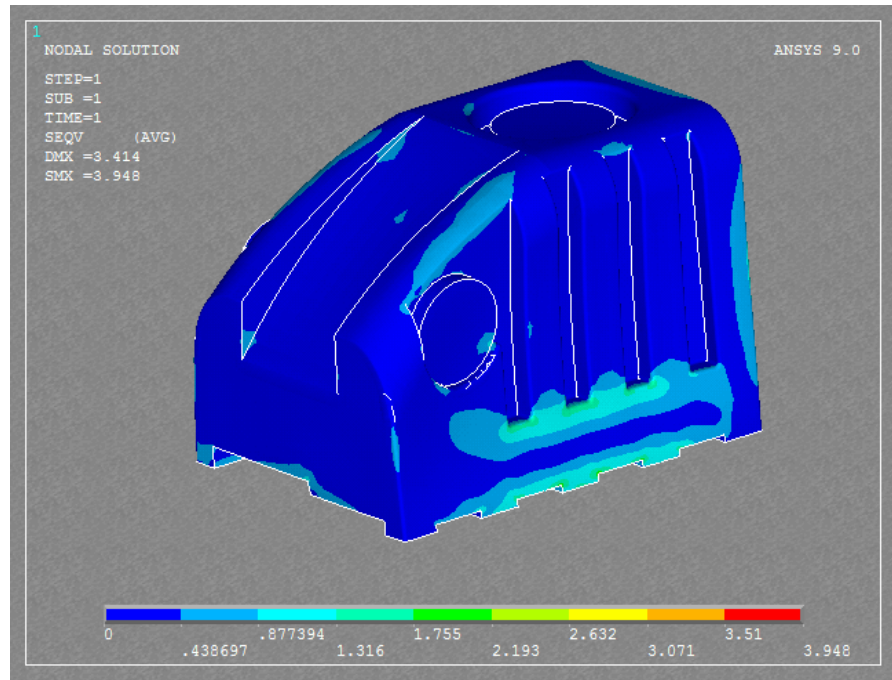
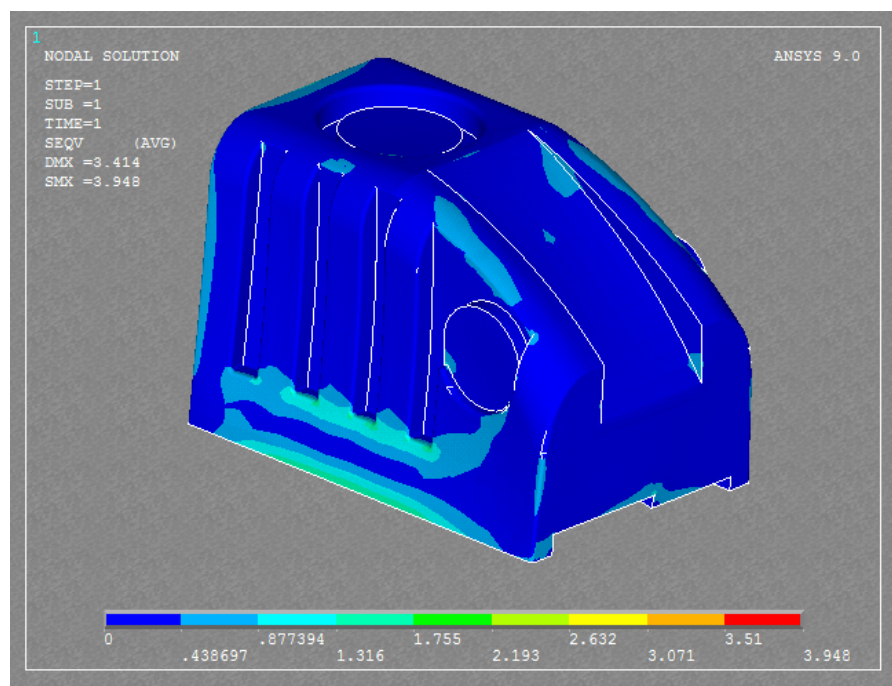


Figura 26: Resultados nodais, deslocamento total (USUM) – reservatório 7



**Figura 27: Resultados nodais, tensão de Von Mises – reservatório 7**



**Figura 28: Resultados nodais, tensão de Von Mises – reservatório 7**

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)