

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**MARILIA FERNANDES BOLSANELLO**

**ANÁLISE DE EFEITO BAUSCHINGER EM FIOS DE AÇO CARBONO**

**VITÓRIA  
2014**

MARILIA FERNANDES BOLSANELLO

**ANÁLISE DE EFEITO BAUSCHINGER EM FIOS DE AÇO CARBONO**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Mecânica.  
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Camargo S. de Macedo

VITÓRIA  
2014

**MARILIA FERNANDES BOLSANELLO**

**TITULO ANÁLISE DE EFEITO BAUSCHINGER EM FIOS DE AÇO CARBONO**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenharia Mecânica.

Aprovada em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2014.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Marcelo Camargo S. de Macedo**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**

---

**Eng. Estevão Cypriano Monteiro Costa**

---

**Prof. Sandro Mauro de Carvalho**  
**FAESA**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus.

## RESUMO

O estudo subsequente trata da análise de fios chatos de aço carbono 1070 sob as condições de produção de um tubo flexível para a extração de petróleo. Amostras de fio de seção transversal 15x5 foram extraídas de diferentes etapas do processo produtivo, bem como de diferentes regiões do spool, que são grandes bobinas nas quais os fios são enrolados e transportados do fornecedor à fábrica. Submetidas a ensaios de tração, suas características tais como limite de escoamento, limite de resistência à tração, coeficiente de resistência e coeficiente de encruamento foram obtidos matematicamente e comparados entre si, de modo a observar tendências que proporcionassem a deformação plástica do fio, causando diminuição no limite de escoamento. Dentre elas, destaca-se o efeito Bauschinger que, no caso, se manifesta pela redução no limite de escoamento ocasionado pelas deformações plásticas prévias sofridas, podendo levar o material a condições de não-conformidade às exigências da empresa.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: estrutura padrão de um tubo flexível .....                                                                                                                                                      | 15 |
| Figura 2: chicanagem .....                                                                                                                                                                                | 17 |
| Figura 3: comportamento geral de tração versus deformação .....                                                                                                                                           | 19 |
| Figura 4: módulo tangente e módulo secante .....                                                                                                                                                          | 20 |
| Figura 5: Ilustração da técnica do limite proporcional para obtenção do limite de escoamento.....                                                                                                         | 21 |
| Figura 6: Ilustração do efeito da estricção em um corpo de prova tradicional.....                                                                                                                         | 23 |
| Figura 7: efeito da estricção nos corpos de prova durante os ensaios (HIBBELER, 2010) .....                                                                                                               | 23 |
| Figura 8: Representação esquemática do comportamento uniaxial tensão-deformação de muitos materiais durante a deformação no sentido inicial e reverso, mostrando o efeito Bauschinger (ABEL, 1987). ..... | 24 |
| Figura 9: ilustração didática do Efeito Bauschinger (DIETER, 1986) .....                                                                                                                                  | 25 |
| Figura 10: Micrografia do aço TRIP, em (a) esquemática, em (b) real de um aço TRIP, (Fonte: Adaptado de Fei e Hodgson, 2006) .....                                                                        | 27 |
| Figura 11: Variação no módulo de elasticidade com a deformação plástica para um aço tipo TRIP.....                                                                                                        | 28 |
| Figura 12: Localização das amostras aproximada das amostras, bem como sua posição no spool e o tratamento pelo qual ela passou.....                                                                       | 30 |
| Figura 13: Ilustração do corpo de prova utilizado no presente trabalho .....                                                                                                                              | 32 |
| Figura 14: extensômetro utilizado na máquina de ensaios de tração.....                                                                                                                                    | 32 |
| Figura 15: corpo de prova pronto para ser ensaiado na máquina de tração .....                                                                                                                             | 33 |
| Figura 16: corpo de prova rompido após o ensaio de tração .....                                                                                                                                           | 34 |
| Figura 17: corpos de prova após ensaio de tração, referentes ao lote 1A .....                                                                                                                             | 36 |
| Figura 18: detalhe da fratura dúctil.....                                                                                                                                                                 | 36 |
| Figura 19: relatório do teste de hipótese entre dois lotes genéricos .....                                                                                                                                | 45 |
| Figura 20: relatório do teste de hipótese entre os lotes 1A, 1B e 5. ....                                                                                                                                 | 49 |
| Figura 21 Teste de Hipótese entre os lotes de amostra 4A e 8B .....                                                                                                                                       | 52 |
| Figura 22: gráfico comparativo das médias e dos limites de escoamento a 1% dos lotes 4A e 4B .....                                                                                                        | 53 |

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 23: Análise estatística desenvolvida no software Minitab comparando os valores de limite de escoamento equivalente aos lotes 2 e 6.....         | 56 |
| Figura 24: Análise estatística desenvolvida no software Minitab comparando os valores de limite de escoamento equivalente aos lotes 3 e 7.....         | 57 |
| Figura 25: Análise estatística desenvolvida no software Minitab comparando os valores de limite de escoamento equivalente aos lotes 1B, 2, 3 e 4B..... | 60 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia e Verdadeira.....                                                                                                   | 39 |
| Gráfico 2: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia e Verdadeira.....                                                                                                   | 40 |
| Gráfico 3: módulo de elasticidade instantâneo (calculado com $n=5$ ) da amostra A1_CP1.....                                                                                    | 41 |
| Gráfico 4: módulo de elasticidade instantâneo (calculado com $n=5$ ) da região elástica da amostra A1_CP1 com linha de tendência .....                                         | 42 |
| Gráfico 5: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia e Verdadeira com reta de aproximação da região elástica para $E=210$ GPa. ....                                      | 43 |
| Gráfico 6: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia e Verdadeira com reta de aproximação da região elástica para $E=165,95$ GPa. <b>Erro! Indicador não definido.</b>   |    |
| Gráfico 7: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia e Verdadeira com reta de aproximação da região elástica e reta paralela a 1% de deformação para $E=165,95$ GPa..... | 42 |
| Gráfico 8: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia e Verdadeira indicando a região elástica onde o formato da curva se aproxima de uma reta.....                       | 42 |
| Gráfico 9: Região elástica da curva tensão versus deformação verdadeira.....                                                                                                   | 42 |
| Gráfico 10: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia e Verdadeira indicando a região plástica onde o formato da curva se aproxima de uma reta.....                      | 48 |
| Gráfico 11: Região plástica da curva tensão versus deformação verdadeira.....                                                                                                  | 50 |
| Gráfico 12: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia para os corpos de prova 1A_CP1, 1B_CP1 e 5_CP2.....                                                                | 52 |
| Gráfico 13: gráfico comparativo das médias e dos limites de escoamento a 1% dos lotes 1A, 1B e 5.....                                                                          | 54 |
| Gráfico 14: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia para os corpos de prova 4A_CP1, 4B_CP1.....                                                                        | 57 |
| Gráfico 15: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia para os corpos de prova 2_CP1, 6_CP1 .....                                                                         | 57 |
| Gráfico 16: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia para os corpos de prova 3_CP1, 7_CP1 .....                                                                         | 57 |

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 17: Comparação entre as médias das amostras referentes aos lotes 2 e 6, retirados da bobina 239 antes e após a armagem, respectivamente ..... | 60 |
| Gráfico 18: Comparação entre as médias das amostras referentes aos lotes 3 e 7, retirados da bobina 057 antes e após a armagem, respectivamente ..... | 61 |
| Gráfico 19: Comparação entre as médias das amostras referentes aos lotes 1B, 2, 3 e 4B.....                                                           | 60 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: composição química do material ensaiado (BEKAERT, 2014).....                                                          | 29 |
| Tabela 2: descrição de cada amostra utilizada no presente trabalho.....                                                         | 30 |
| Tabela 5: valores do Módulo de Elasticidade calculados pelo método gráfico para as amostras dos lotes 1A e 4 <sup>a</sup> ..... | 43 |
| Tabela 6: limite de escoamento a 1% calculado das amostra dos lotes 1A, 1B e 5..                                                | 49 |
| Tabela 7: coeficiente de resistência calculado para as amostras dos lotes 1A, 1B e 5.<br>.....                                  | 50 |
| Tabela 8: limite de escoamento a 1% calculado das amostra dos lotes 4A e 4B.....                                                | 51 |
| Tabela 9: coeficiente de resistência calculado para as amostras dos lotes 4A e 4B.                                              | 53 |
| Tabela 10: limite de escoamento a 1% calculado das amostra dos lotes 2 e 6.....                                                 | 55 |
| Tabela 11: limite de escoamento a 1% calculado das amostra dos lotes 3 e 7.....                                                 | 55 |
| Tabela 12: coeficiente de resistência calculado para as amostras dos lotes 2 e 6. ..                                            | 58 |
| Tabela 13: coeficiente de resistência calculado para as amostras dos lotes 3 e 7. ..                                            | 58 |
| Tabela 14: coeficiente de resistência calculado para as amostras dos lotes 1B, 2, 3 e 4B.....                                   | 61 |

## SUMÁRIO

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Capítulo 1 - INTRODUÇÃO.....                                                   | 13 |
| 1.1 Motivação.....                                                             | 13 |
| 1.2 Objetivos .....                                                            | 13 |
| 1.3 Estrutura do trabalho.....                                                 | 14 |
| Capítulo 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....                                       | 15 |
| 2.1 O tubo flexível .....                                                      | 15 |
| 2.2 Processo de armagem .....                                                  | 16 |
| 2.3 Processo de Bobinagem .....                                                | 16 |
| 2.4 Princípios de fabricação do fio utilizado no estudo .....                  | 17 |
| 2.4.1 Trefilação.....                                                          | 17 |
| 2.4.2 Laminação .....                                                          | 17 |
| 2.4.3 Alívio de tensões .....                                                  | 18 |
| 2.5 Comportamento tensão-deformação.....                                       | 18 |
| 2.6 O módulo de Elasticidade ou Módulo de Young .....                          | 19 |
| 2.7 Limite Convencional de Escoamento .....                                    | 20 |
| 2.8 Encruamento .....                                                          | 21 |
| 2.9 Limite de Resistência à Tração .....                                       | 22 |
| 2.10 O Efeito Bauschinger .....                                                | 24 |
| 2.11 Variação do módulo de elasticidade induzido por deformação plástica ..... | 27 |
| 2.12 O aço TRIP .....                                                          | 27 |
| Capítulo 3 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....                                 | 29 |
| 3.1 Material ensaiado .....                                                    | 29 |
| 3.2 Retirada das amostras .....                                                | 29 |
| 3.3 Ensaio de tração .....                                                     | 31 |
| 3.4 Testes de hipóteses .....                                                  | 37 |
| Capítulo 4 - METODOLOGIA.....                                                  | 38 |
| 4.1 As curvas de tensão versus deformação de engenharia.....                   | 38 |
| 4.2 Determinação do Módulo de Elasticidade .....                               | 39 |
| 4.3 Determinação do Módulo de Elasticidade pelo Método Gráfico .....           | 40 |
| 4.4 Determinação do Coeficiente de Encruamento pelo Método Gráfico.....        | 43 |
| 4.5 Testes de hipótese para comparação das médias.....                         | 45 |

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Capítulo 5 - RESULTADOS .....                                                                                                     | 47 |
| 5.1   Variações no limite de escoamento ao longo do processo .....                                                                | 47 |
| 5.2   Variações no limite de escoamento durante a bobinagem.....                                                                  | 51 |
| 5.3   Variações no limite de escoamento devido à armagem.....                                                                     | 53 |
| 5.4   Variações no limite de escoamento de acordo com o raio de curvatura<br>proporcionado pela localização do fio no spool ..... | 58 |
| Capítulo 6 - CONCLUSÕES.....                                                                                                      | 62 |
| Capítulo 7 - ESCORÇO BIBLIOGRÁFICO.....                                                                                           | 64 |

## **Capítulo 1 - INTRODUÇÃO**

### **1.1 Motivação**

As empresas de tubos flexíveis, responsáveis pelo transporte do óleo do fundo do mar até a plataforma, têm buscado se adaptar à demanda por produtos mais resistentes e eficazes, capazes de exercer com maestria o trabalho tanto em águas rasas quanto profundas. Isso porque, prevendo não só maiores lucros como também o fim da disponibilidade do óleo em reservatórios mais acessíveis, iniciou-se uma corrida contra o tempo para a extração do denominado “pré-sal”, localizado abaixo da camada de sal, no fundo do oceano. Ou seja, sua extração é feita em condições de trabalho bem mais severas.

Ao longo das últimas décadas, os tubos flexíveis comercializados não só passaram por modificações estruturais como também sua composição química foi posta a prova, dado que as condições mais profundas apresentam níveis maiores de substâncias corrosivas. O processo produtivo tem passado por contínuo aprimoramento, de modo a assegurar a fabricação de produtos com ótima condição de trabalho.

Com isso em foco, o estudo subsequente visa a análise de uma parte do processo produtivo de tubos flexíveis, englobando camada fabricada de aço carbono, de modo a investigar possíveis problemas ou pontos de melhoria. Ou seja, contribuir, ainda que em pequena escala, para o aprimoramento da extração de petróleo no país.

### **1.2 Objetivos**

O estudo subsequente tem por finalidade analisar a ocorrência do efeito Bauschinger em fios de aço carbono durante sua utilização na fabricação de tubos flexíveis. Isso porque tal fenômeno se caracteriza pela perda das propriedades mecânicas do material, reduzindo seu limite de escoamento e tornando-o inadequado para utilização na produção.

Ao longo dos últimos anos, estudos acerca do fenômeno já comprovaram seu efeito em chapas de aço de baixo carbono em processos de estampagem, levando a adaptações nos mesmos para que a queda no limite de escoamento não afetasse a produção. A análise realizada visa, a partir do mesmo princípio, comprovar a existência e a magnitude de tal efeito dadas as tensões resultantes não só do processo produtivo,

como também dadas as tensões residuais oriundas do próprio empaque do material. Isso porque os fios de aço carbono utilizados pela empresa são transportados em grandes spools de, em média, 2 toneladas, o que implica em deformações plásticas aparentes no fio localizado nas partes mais internas do spool.

Comprovados o fenômeno, sua causa e sua magnitude, podem ser estabelecidas junto à empresa e ao fornecedor, medidas que minimizem o efeito Bauschinger nos fios de aço carbono e evite que entrem em não conformidade com as especificações de produção exigidas.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

Para avaliar a ocorrência, a magnitude e as causas do efeito Bauschinger nos fios de aço carbono utilizados na produção de tubos, foi tomado um spool específico de material, e avaliadas amostras localizadas em diferentes regiões no mesmo, submetidas a diferentes etapas do processo produtivo.

Uma vez submetidos a ensaios de tração, foi possível analisar parâmetros intrínsecos ao material, tais como seu módulo de elasticidade característico, bem como aqueles referentes a cada amostra analisada, tais como a tensão de escoamento e o coeficiente de encruamento.

Tais parâmetros, apesar de numéricos, foram utilizadas em caráter qualitativo, de modo a comparar os fios submetidos a diferentes tensões resultantes do processo e do empaque. Foi realizada uma também uma análise estatística de modo a reafirmar diferenças nas propriedades de cada lote de amostras e assegurar a existência ou não do efeito Bauschinger nos fios.

Uma vez concluído e confirmado, são buscadas soluções para minimizar o efeito, de modo a não prejudicar não só o material como também o processo produtivo como um todo.

## Capítulo 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 O tubo flexível

Um tubo flexível é constituído por várias camadas diferentes. Os principais componentes são barreiras termoplásticas estanques e fios de aço resistente à corrosão.



*Figura 1: estrutura padrão de um tubo flexível*

Os fios de aço enroladas em forma helicoidal dar a estrutura da sua resistência de alta pressão e excelentes características de flexão, fornecendo assim flexibilidade e o comportamento dinâmico. Esta construção modular, onde as camadas são independentes, mas projetado para interagir umas com as outras, possibilita que cada camada pode ser feita ajustada a uma finalidade de forma independente para melhor atender a um requisito específico.

## **2.2 Processo de armagem**

A camada de armagem é uma camada que garante resistência a esforços de tração ao tubo flexível, ela é produzida com fios de diversas bitolas escolhidas em função do peso da estrutura flexível. Esses fios antes de pousarem sobre o tubo passam por alguns processos de conformação. Esses processos de conformação como dobramento, torção e tração, são responsáveis por garantir a integridade física dos fios antes de chegar ao tubo e por conformá-lo de maneira que ele possa se adequar melhor ao diâmetro do tubo sobre o qual ele é colocado. A matéria prima da camada de armagem, o fio chato, chega a empresa em grandes bobinas denominadas “spool”. A máquina de armagem só admite a matéria prima em bobinas menores (três a quatro vezes menores que o spool), desta forma, se faz necessário um processo de bobinagem que objetiva transferir o fio chato de um spool para diversas bobinas menores.

## **2.3 Processo de Bobinagem**

Do ponto de vista da conformação do material, durante o processo de bobinagem, o fio passa por dois dispositivos que proporcionam conformações significativas. No primeiro dispositivo, o fio é conformado em três polias de aproximadamente 400 mm. No segundo dispositivo, chamado de chicanagem, o fio é conformado por cinco polias (de diâmetros menores que o do primeiro dispositivo) conforme mostrado na Figura 2.



*Figura 2: chicanagem*

É neste dispositivo que o fio sofre os esforços mais intensos. A chicanagem funciona como um dispositivo fusível responsável por garantir a integridade física dos fios antes de chegar ao tubo. Devido aos grandes esforços aos quais o fio é submetido, se houver algum defeito, o fio romperá ali mesmo.

## **2.4 Princípios de fabricação do fio utilizado no estudo**

### **2.4.1 Trefilação**

Trefilação é um processo cujo o objetivo é obter fios, barras ou tubos através de um processo de conformação plástica, normalmente realizado a frio, que consiste em passar o material por uma ferramenta denominada fieira que apresenta dimensão decrescente. A matéria prima para a trefilação são perfis extrudados ou laminados (CUBBERLY E BAKERJIAN, 1989).

### **2.4.2 Laminação**

Laminação é um processo que pode ser realizado a quente e frio, no qual o material é forçado a passar entre dois cilindros girando em sentidos opostos, com mesma velocidade superficial, distanciados entre si de uma distância que é menor que a espessura do material a ser deformado. Ao passar entre os cilindros o material sofre deformação plástica o que acarreta numa diminuição da espessura e um consequente aumento do comprimento e da largura (CUBBERLY E BAKERJIAN, 1989).

### **2.4.3 Alívio de tensões**

A superposição de tensões internas nas peças pode levar a alterações de forma indesejáveis (empenamento) ou até mesmo à ruptura. Quando o surgimento destas tensões é previsível, por exemplo, após o resfriamento de uma peça fundida ou após a têmpera, então o tratamento para alívio de tensões deverá ser realizado, na medida do possível, imediatamente após o surgimento de tensões. O tratamento de alívio de tensões consiste no aquecimento do material abaixo da temperatura crítica (onde ocorre a mudança de fase), mantendo aquecido por uma ou duas horas para homogeneização da temperatura e em seguida realiza-se um resfriamento lento. Este tratamento tem o intuito de reduzir as tensões internas sem alteração intencional da estrutura, portanto as propriedades das peças tratadas não mudam significativamente. Deve-se dar uma atenção especial ao aumento de temperatura pois na maioria dos materiais, acarreta na diminuição da resistência e da tensão de escoamento.

## **2.5 Comportamento tensão-deformação.**

O grau até onde uma estrutura se deforma ou se escoar depende da magnitude de uma tensão imposta (CALLISTER et al). Para muitos metais que são tensionados em tração e em relativamente baixos níveis, tensão e deformação são proporcionais entre si através da Lei de Hooke mostrada abaixo:

$$\sigma = E * \varepsilon$$

Onde:

- $\sigma$  é a tensão de engenharia;
- $E$  (psi ou MPa) é o módulo de elasticidade ou *módulo de Young*;
- $\varepsilon$  é a deformação de engenharia;

Para muitos metais típicos a magnitude do Módulo de Young varia entre  $4,5 \times 10^4$  MPa para o magnésio, e  $40,7 \times 10^4$  MPa para o tungstênio.

A região na qual tensão e deformação são proporcionais é chamada região de deformação elástica; um gráfico de tensão (ordenada) versus deformação (abcissa) resulta numa correlação linear, como mostrado na “região elástica” da Figura 3.

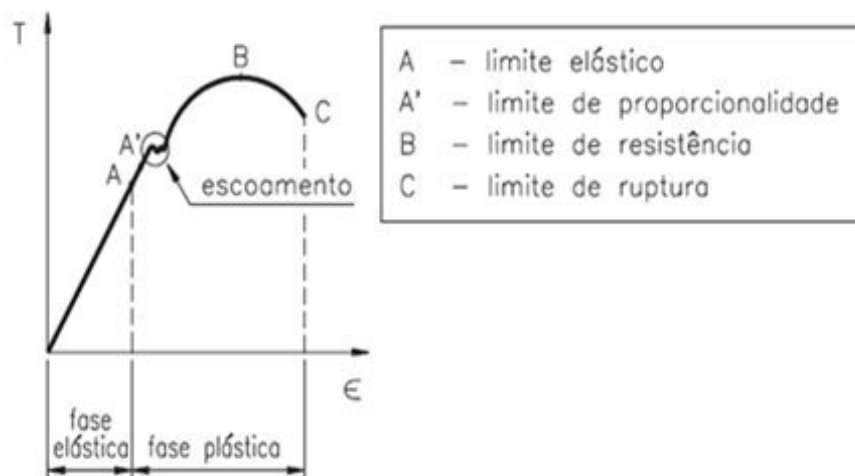


Figura 3: comportamento geral de tração versus deformação

## 2.6 O módulo de Elasticidade ou Módulo de Young

A tangente do segmento linear da Figura 3 corresponde ao módulo de elasticidade. Este módulo pode ser interpretado como a rigidez do material ou a resistência do material à deformação elástica. Quanto maior o módulo, mais rígido é o material, ou menor é a deformação elástica. A deformação elástica é não-permanente, o que significa que quando a carga aplicada for aliviada, a peça se retorna à sua forma original.

Existem alguns materiais (por exemplo, ferro fundido cinzento e concreto) para os quais a porção inicial elástica da curva de tensão-deformação não é linear, portanto, não é possível determinar um módulo de elasticidade como descrito acima. Para este comportamento não linear, tanto o módulo tangente quanto o módulo secante são normalmente usados. Módulo tangente é tomado como a inclinação da curva de tensão-deformação em algum nível de tensão especificado, enquanto que o módulo secante representa a inclinação de uma secante traçada a partir da origem até algum dado ponto da curva tensão versus deformação. A determinação destes módulos é ilustrada na Figura 4.

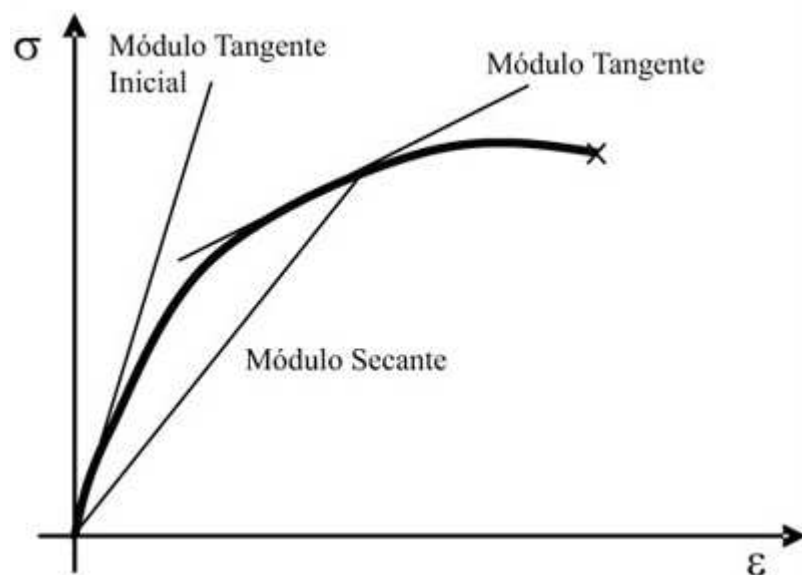


Figura 4: módulo tangente e módulo secante

## 2.7 Limite Convencional de Escoamento

Muitas estruturas são projetadas para assegurar que apenas deformação elástica resultará quando uma tensão for aplicada. É, portanto, desejável conhecer o nível de tensão no qual deformação plástica começa, ou onde ocorre o fenômeno do escoamento. Para metais que experimentam esta gradual transição, o ponto de escoamento pode ser determinado como o desvio inicial a partir da linearidade da curva tensão-deformação; isto é às vezes denominado limite proporcional. Em tais casos a posição deste ponto pode não ser determinado precisamente. Como uma consequência, uma convenção foi estabelecida onde uma linha reta é construída

paralelamente à porção elástica da curva de tensão-deformação em especificado desvio de deformação, usualmente 0,2%. A tensão correspondente à interseção desta linha e a curva tensão-deformação quando ela se curva na região plástica é definida como o limite convencional de escoamento. Uma ilustração do método de obtenção do limite proporcional a 0,2% é mostrada na Figura 5.

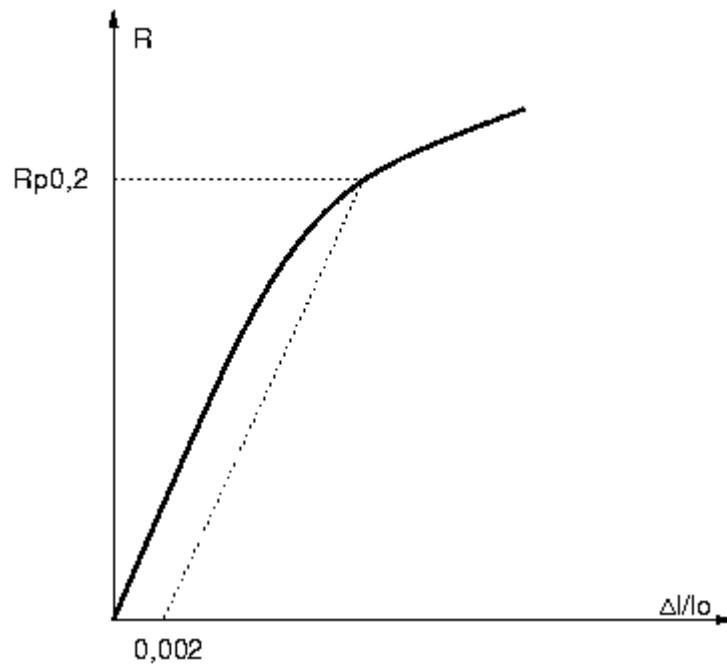


Figura 5: Ilustração da técnica do limite proporcional para obtenção do limite de escoamento

Nos ensaios do presente trabalho foi considerado o valor de escoamento obtido a 1% de deformação, pois esta é o método difundido dentro da empresa onde os mesmos foram feitos. A magnitude do limite convencional de escoamento para um metal é uma medida de sua resistência à deformação plástica. Limites de escoamento podem variar desde 35 MPa para uma liga de alumínio de baixa resistência até mais de 1400 MPa para aços de alta resistência.

## 2.8 Encruamento

O encruamento do material é o endurecimento por deformação a frio, ou seja, quanto mais a força vai agindo sobre o corpo-de-prova, mais resistente ele vai se tornando. Este fato pode ser observado pelo aumento contínuo da tensão, à medida que o ensaio se processa após o escoamento. Isto ocorre devido às interações entre as

discordâncias que impedem o escorregamento dos planos cristalográficos, formando barreiras para a deformação (SOUSA, 1982).

Nos aços com baixos teores de carbono que tem comportamento plástico determinado pela equação de Hollomon, o coeficiente de encruamento  $n$  pode ser calculado a partir da inclinação da curva tensão-deformação verdadeira, quando esta é plotada em escala logarítmica (ASTM E646).

$$\sigma = K * \varepsilon^n$$

Onde,

- $\sigma$  é a tensão verdadeira;
- $K$  é uma constante;
- $\varepsilon$  é a deformação verdadeira.

## 2.9 Limite de Resistência à Tração

Após o escoamento, a tensão necessária para continuar a deformação plástica cresce até um máximo e a seguir decresce até a fratura eventual, ponto  $F$ . O limite de resistência à tração  $TS$  é a tensão no máximo na curva de tensão-deformação de engenharia. Isto corresponde à tensão máxima que pode ser suportada por uma estrutura em tração; se esta tensão é aplicada e mantida, a fratura acontecerá. Toda deformação até este ponto é uniforme através de toda a região mais estreita da amostra de tração. Entretanto, nesta tensão máxima, uma pequena estrição ou empescoamento começa a se formar em algum ponto e toda subsequente deformação é confinada nesta região que sofreu estrição. O efeito da estrição em um corpo de prova é mostrado na Figura 6.

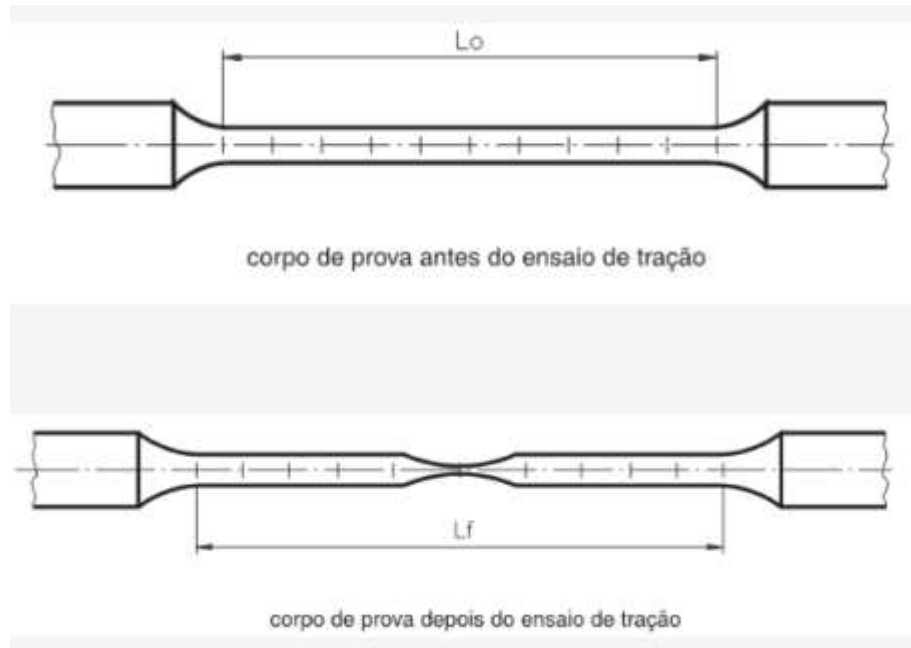


Figura 6: Ilustração do efeito da estricção em um corpo de prova tradicional

A Figura 7 mostra o efeito da estricção nos corpos de prova durante os ensaios

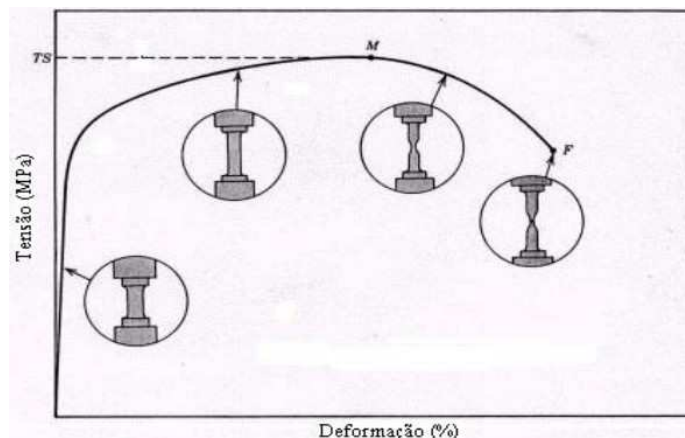


Figura 7: efeito da estricção nos corpos de prova durante os ensaios (HIBBELER, 2010)

A resistência à fratura ou resistência à ruptura corresponde à tensão na fratura.

O limite de resistência à tração varia de acordo com o material bem como as condições do mesmo, desde 50 MPa para alumínio até cerca de 3000 MPa para aços de alta resistência mecânica.

## 2.10 O Efeito Bauschinger

Uma definição para o efeito Bauschinger é a seguinte: quando os materiais são carregados em uma direção axial (por exemplo, tração) no regime plástico, descarregados e, em seguida, recarregados no sentido inverso (por exemplo, compressão), eles podem produzir, durante a recarga, um nível de tensão mais baixo do que o do carregamento realizado no sentido original (YAN, 1998 citado em HAUS, 2011). A Figura 8 é a representação esquemática do efeito Bauschinger.

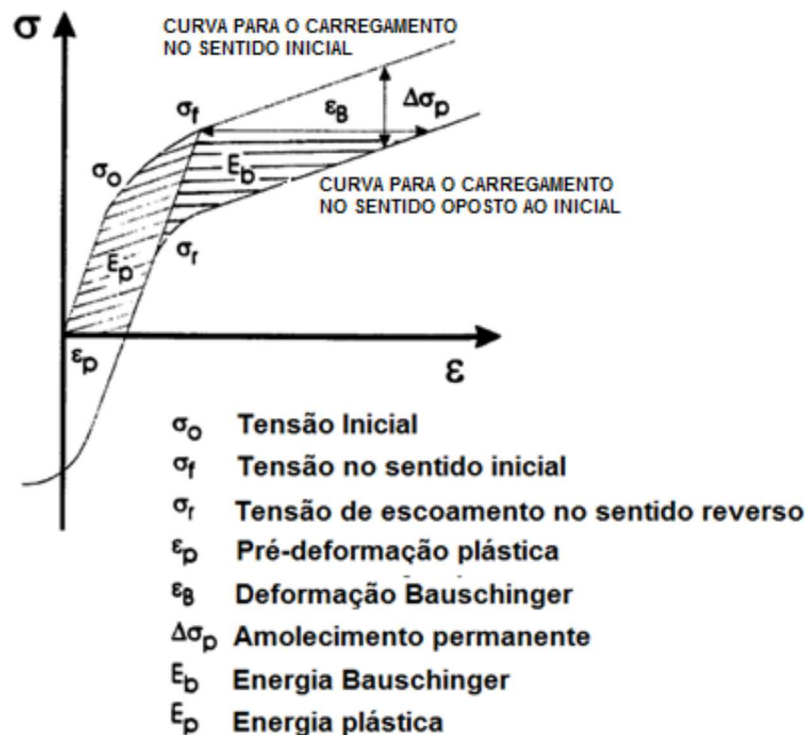


Figura 8: Representação esquemática do comportamento uniaxial tensão-deformação de muitos materiais durante a deformação no sentido inicial e reverso, mostrando o efeito Bauschinger (ABEL, 1987).

Outra ilustração do efeito Bauschinger é mostra na Figura 9.

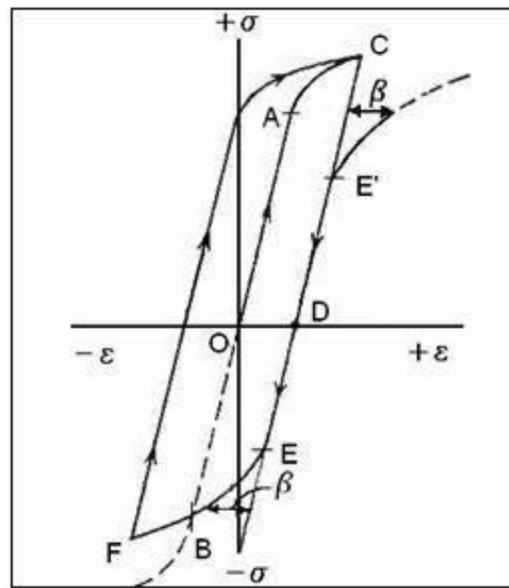


Figura 9: ilustração didática do Efeito Bauschinger (DIETER, 1986)

Da Figura 9, a tensão de escoamento do material sob efeito de tração é (A). Se o mesmo material (dúctil) fosse testado em compressão, a tensão de escoamento seria aproximadamente a mesma indicada no ponto B da curva pontilhada. Agora, consideremos um novo corpo-de-prova sob tração, passando a tensão de escoamento até C ao longo do caminho O-A-C. Se o corpo-de-prova for então descarregado, ele seguirá o caminho C-D, sendo desprezado um pequeno efeito de histerese elástica. Se agora uma tensão compressiva for aplicada, o escoamento plástico irá começar numa tensão correspondente ao ponto E, tensão que é consideravelmente mais baixa do que a tensão limite de escoamento compressiva do material (B). Enquanto devido ao encruamento de A até C a tensão de escoamento na tração foi aumentada, a tensão de escoamento na compressão foi diminuída. Este efeito é o efeito Bauschinger. Ou seja,  $SC > SB$ .

Desde sua primeira citação feita por BAUSCHINGER (1886), este efeito tem sido amplamente estudado. É agora claro que as descobertas de Bauschinger trataram apenas uma parte dos fenômenos envolvidos e que o comportamento direcional na relação tensão-deformação é mais complexo do que o pensamento original. HAUS (2011) demonstra a complexidade deste efeito pela diversidade das descrições do mesmo que se sucederam desde 1986 até os tempos atuais, algumas destas descrições são mostradas abaixo:

*"Se um corpo é altamente deformado em uma direção e então imediatamente recarregado na direção oposta, ele começa a fluir nessa direção com uma redução da tensão. Este é o efeito Bauschinger."* (COTTRELL, 1953).

*"O efeito Bauschinger é medido pela tensão Bauschinger  $\beta$ ."* (BUCKLEY e ENTWISTLE, 1956).

*"Originalmente observado em policristais, porém depois encontrado também em monocrystal simples, o efeito Bauschinger denota certa dependência da tensão de escoamento e taxa de encruamento sobre o histórico do metal."* (VAN BUEREN, 1960).

*"A redução do limite de elasticidade, quando a deformação em uma direção é seguida por deformação na direção oposta, é chamada de efeito Bauschinger."* (DIETER, 1981).

*"O efeito Bauschinger envolve não só uma deformação plástica prematura, mas também certa quantidade de amolecimento permanente ou não encruamento."* (MCCLINTOCK e ARGON, 1966).

É importante ressaltar, contudo, que o Efeito Bauschinger varia de acordo com a natureza do material em vogue. Para materiais moles, com  $UTS/YS > 1,4$ , a tendência é de endurecer, ao passo que os materiais duros, de  $UTS/YS < 1,2$ , tendem a "amolecer". De acordo com Hatzberg (1996) tal fenômeno está relacionado à natureza e à estabilidade da natureza de discordância. Para materiais inicialmente macios, a densidade de discordâncias é baixa, e como resultado dos ciclos de deformações plásticas, esta densidade de discordâncias aumenta rapidamente, contribuindo significativamente para o endurecimento por deformação. Na contramão, quando o material encontra-se duro inicialmente, um subsequente ciclo de deformação causa

um rearranjo das discordâncias em uma nova configuração que oferece menos resistência à deformação.

### 2.11 Variação do módulo de elasticidade induzido por deformação plástica

YU (2009) mostrou que simulações de retorno elástico em aços TRIP foram mais precisas quando o módulo de elasticidade foi considerado variável. Além disso, YU (2013) mostrou a diminuição do Módulo de Elasticidade de aços TRIP durante a deformação plástica. Esta diminuição foi consequência de uma mudança na dinâmica do movimento de discordâncias, devido a alterações na densidade e na complexidade das discordâncias, que induziu uma variação na força de ligação atômica que finalmente levou a uma variação no módulo de elasticidade.

### 2.12 O aço TRIP

O aço TRIP (a sigla TRIP em inglês significa “Transformation Induced Plasticity”) é um material multifásico com austenita retida em uma matriz primária ferrítica. Além de um volume mínimo de 5% de austenita retida, fases duras como martensita e bainita estão presentes em quantidades variadas (Figura 10).

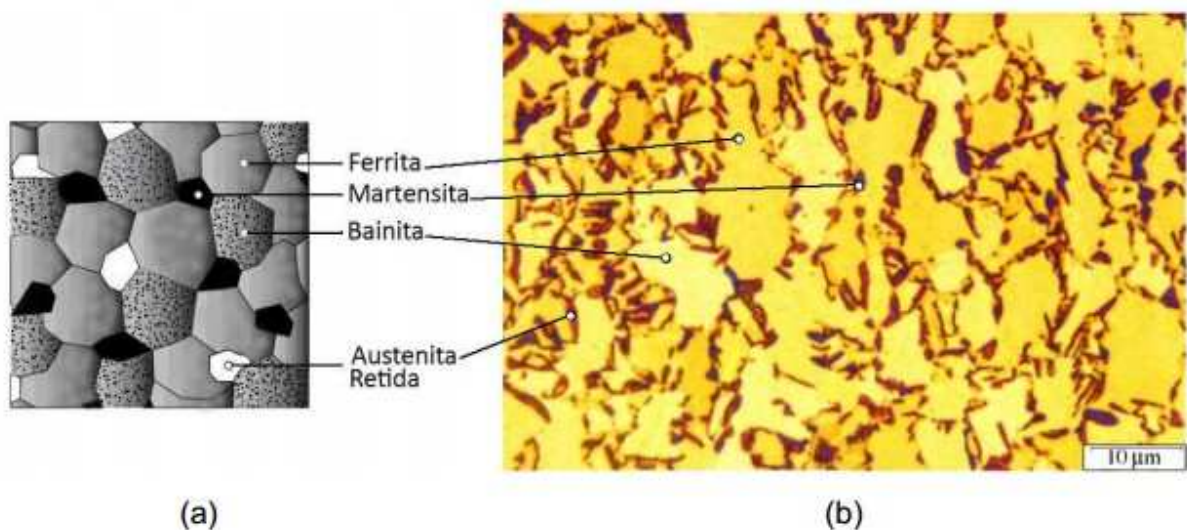


Figura 10: Micrografia do aço TRIP, em (a) esquemática, em (b) real de um aço TRIP, (Fonte: Adaptado de Fei e Hodgson, 2006)

Este material normalmente é obtido através de um tratamento isotérmico na faixa de temperatura da formação de bainita após um recozimento intercrítico (LEE, 2008). O recozimento ocorre na região de fases austenita e ferrita que objetiva supersaturar a fase austenita com Carbono e assim obter martensita após a têmpera, mesmo em materiais com níveis de Carbono menos elevados (CALLISTER, 2008).

Do ponto de vista microestrutural, estes aços, inicialmente austeníticos, apresentam composição química que permite a transformação desta austenita retida em martensita através da deformação, resultando em resistência mecânica mais elevada e, simultaneamente, maior ductilidade. A composição química destes aços é composta basicamente de Fe, C, Mn e Si.

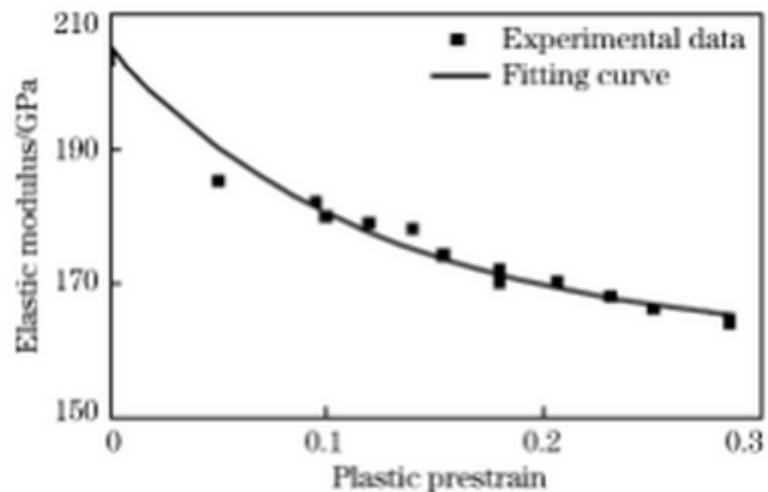


Figura 11: Variação no módulo de elasticidade com a deformação plástica para um aço tipo TRIP

## Capítulo 3 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 3.1 Material ensaiado

Foi ensaiado um fio chato de perfil de 15x5 mm, escolhido de acordo com a disponibilidade da fábrica. Trata-se de um aço 1070, conforme as especificações abaixo:

| C (%) | Mn (%) | P (%) | S (%) | Si (%) | Al (%) | N (%) |
|-------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|
| 0,722 | 0,735  | 0,018 | 0,007 | 0,228  | 0,028  | 0,004 |

*Tabela 1: composição química do material ensaiado (BEKAERT, 2014)*

De acordo com ensaios mecânicos realizados pelo fornecedor, esse material se encontra dentro das exigências da empresa, que incluem a ausência de defeitos, limite de escoamento mínimo de 1080 MPa e limite de resistência de 1200 MPa.

O material foi recebido na fábrica em um spool de 2,017 toneladas, de diâmetro externo 1120 mm e interno de 690 mm, e devidamente encaminhado para a produção.

### 3.2 Retirada das amostras

Os corpos de prova ensaiados foram fios de aço carbono retirados de partes distintas do spool, bem como submetidos a diferentes etapas do processo produtivo. Ou seja, cada lote de peças possui uma tensão residual distinta, oriunda de quatro fatores principais:

- Tensões residuais próprias do processo produtivo, conforme descrito no item 2.4.3;
- Esforços provenientes da localização do fio no spool, onde a diminuição do ângulo é inversamente proporcional à tração à qual o fio está submetido, bem como o raio de curvatura menor faz com que o fio esteja mais flexionado, acarretado em tensões maiores;

- Tensões oriundas do processo de transferência do spool para a bobina que será inserida na armadora, no processo conhecido como bobinagem, melhor descrito no item 2.3,
- Esforços de torção e tração aos quais o fio é submetido durante a puxada, para que seja devidamente depositado sobre as camadas anteriores do tubo.

Com o intuito de obter diferentes combinações entre esses esforços, as amostras foram retiradas da seguinte maneira:

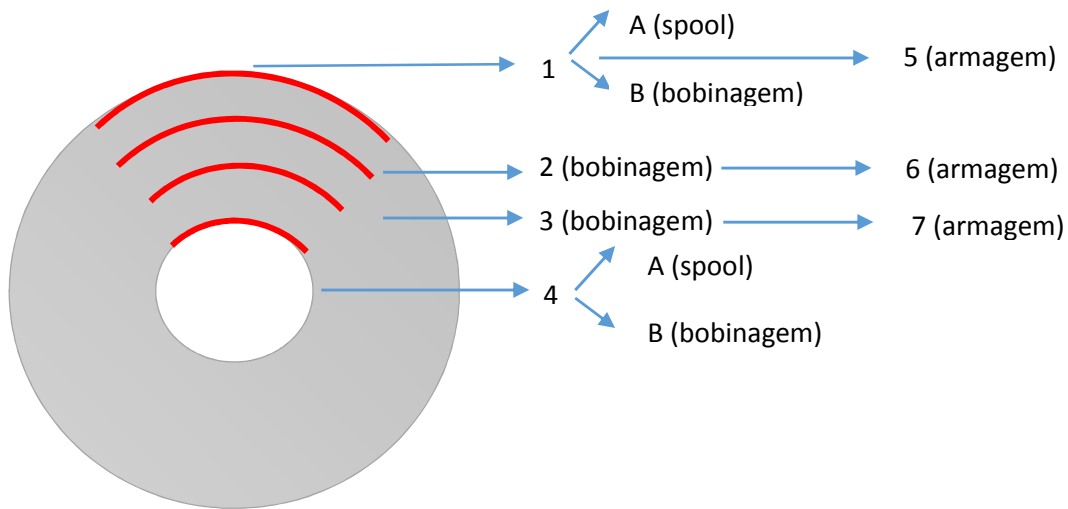


Figura 12: Localização das amostras aproximada das amostras, bem como sua posição no spool e o tratamento pelo qual ela passou

| Amostra | Bobina | Localização                                             |
|---------|--------|---------------------------------------------------------|
| 1A      | 135    | Começo do spool – antes da bobinagem                    |
| 1B      | 135    | Começo do spool – depois da bobinagem                   |
| 2       | 239    | Antes de encher a segunda bobina – depois da bobinagem  |
| 3       | 057    | Antes de encher a terceira bobina – depois da bobinagem |
| 4B      | 287    | Fim do spool – depois da bobinagem                      |
| 4A      | 287    | Fim do spool – antes da bobinagem                       |
| 5       | 135    | Começo da bobina 135 - após puxada na armadora          |
| 6       | 239    | Começo da bobina 239 - após puxada na armadora          |
| 7       | 057    | Começo da bobina 057 - após puxada na armadora          |

Tabela 2: descrição de cada amostra utilizada no presente trabalho

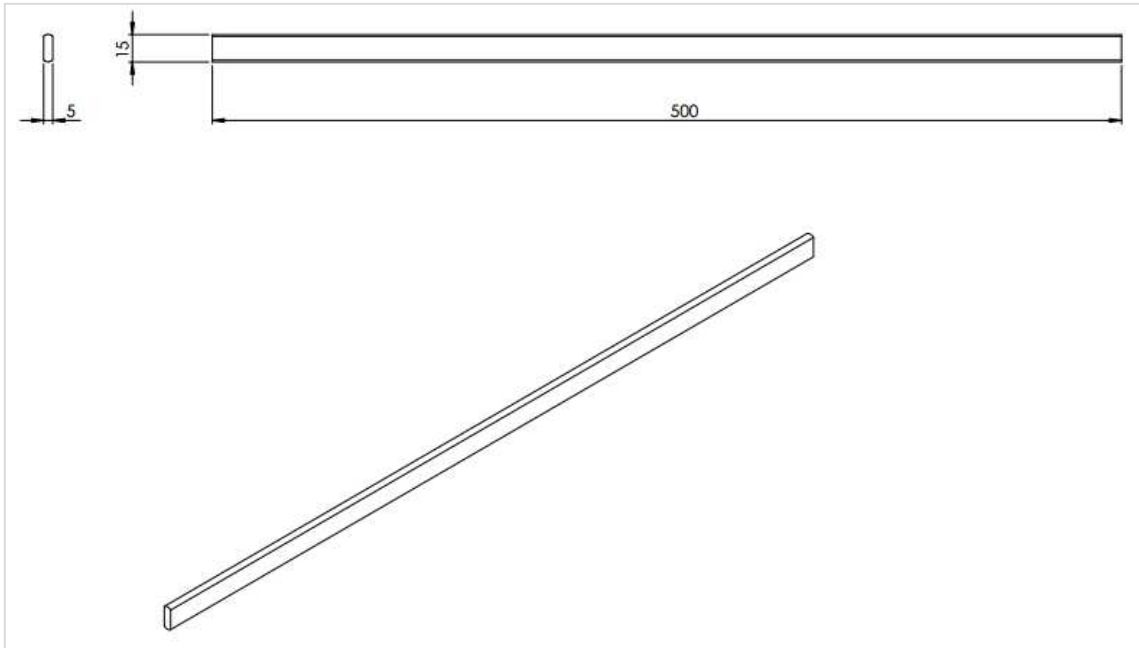
Vale ressaltar que, após o início da bobinagem do spool, fica impossibilitada a retirada de amostras diretamente dele. Isso porque a instalação do fio no processo de bobinagem é manual e minuciosa, não podendo ser repetido a cada retirada de amostras. Em decorrência disso, as amostras de raios de curvatura intermediários, entre os extremos internos e externos, foram retiradas após a bobinagem, ao começo de cada nova bobina a ser preenchida com o spool em questão.

Ademais, as amostras retiradas da parte mais interna do spool também sofreram deformação plástica. Em decorrência disso, ao serem retiradas notou-se um raio de curvatura remanescente.

Além disso, após a puxada na armadora, previamente descrita, o fio encontra-se deformado tal como seria depositado sobre as camadas anteriores do tubo flexível. Logo, após a retirada das amostras nas três situações, é necessário o desempenho manual das mesmas, de modo a tornar possível seu acoplamento às garras da máquina onde será realizado o ensaio de tração. Tal procedimento gera, inevitavelmente, um acúmulo de tensões no fio, a ser somado àqueles mencionados nos itens a, b e c acima.

### **3.3 Ensaio de tração**

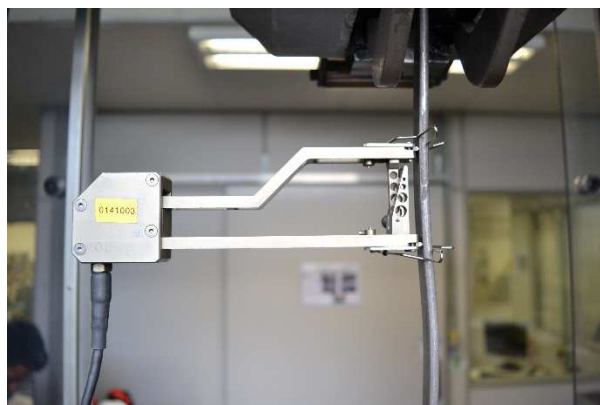
Foram ensaiados fios de aço-carbono 1070 com perfil de 15 x 5 mm e 500 mm de comprimento. Cada um dos sete lotes especificados era composto de cinco amostras, tendo sido ensaiados conforme a norma ASTM E 8/E 8M – 08.



*Figura 13: Ilustração do corpo de prova utilizado no presente trabalho*

A máquina utilizada para os ensaios de tração é da marca EMIC, modelo DL 1000. Com capacidade para 10 kN, é de conceito eletromecânico com acionamento através de fusos e esferas recirculantes, colunas guias e servo-controle.

As informações obtidas pela máquina são processadas em um microcomputador, através do software de ensaios TESC – EMIC instalado no mesmo. Além de fornecer a força ao longo do tempo, um extensômetro acoplado é capaz de precisar a deformação sofrida pelo fio até que atinja o limite de resistência à tração. O extensômetro é mostrado na Figura 14.



*Figura 14: extensômetro utilizado na máquina de ensaios de tração*

Previamente à realização dos ensaios, o comprimento da amostra e da área transversal do fio foram aferidas, tendo se mostrado de acordo com a especificação.

Em sequência, as amostras foram fixadas nas garras do equipamento, o extensômetro foi devidamente acoplado e iniciou-se a submissão do fio a esforços trativos crescentes, uniaxiais na direção do comprimento da amostra, até que o limite de resistência à tração fosse alcançado.



*Figura 15: corpo de prova pronto para ser ensaiado na máquina de tração*

Nesse ponto, a tensão atuante no fio inicia uma queda devido ao efeito de estricção, e sua ruptura pode ocorrer a qualquer momento. Por isso, quando esse patamar é atingido, o programa emite um aviso pra que o extensômetro seja retirado e não sejam causados danos a esse aparelho pela ruptura abrupta do fio. Feito isso, o teste prossegue até a ruptura total da amostra.

Uma vez que a amostra se rompe, o teste é finalizado e a mesma retirada da máquina. As partes são então unidas, o comprimento novamente medido e o valor registrado.



*Figura 16: corpo de prova rompido após o ensaio de tração*

Ao longo do ensaio, a máquina afere os valores de tempo e força instantânea aplicada, além da deformação ocorrida no fio, que é captada pelo extensômetro acoplado. Tal conjunto de valores é manipulada de modo a fornecer a curva tensão versus deformação à medida em que o ensaio é realizado, unindo os pontos fornecidos pela máquina e plotando uma curva entre eles.

Em sequência, o programa capta, dentre os pontos fornecidos, quais aqueles entre os quais uma maior reta pode ser traçada. Essa reta é tomada então como uma aproximação para o comportamento elástico do fio, e sua paralela é plotada novamente no ponto onde a deformação do fio atinge 1% de seu comprimento original. Como se trata de uma amostra de 500 mm, tal reta é plotada no ponto de deformação equivalente a 5 mm. Então, a interseção da mesma com a curva de tensão x deformação é tomada como o limite de escoamento do material.

Embora houvesse também a opção de calcular o limite de escoamento do material a 0,2%, optou-se por usar seu valor a 1%. Isso porque, em alguns materiais, é impossível obter o valor do escoamento a 0,2%. Ainda assim, o programa é capaz de

extrapolar o ensaio e fornecer os valores de limite de escoamento em ambos os casos, reproduzindo a mesma reta paralela no ponto em que a amostra atinge 1 mm, e calculando sua interseção com a curva tensão x deformação.

Conforme explicitado, apenas as amostras referentes ao lote 1A, retiradas diretamente da parte mais externa do spool, estavam em condições ideais para o teste. Nas demais, houve a necessidade do desempenho manual. Tal procedimento, ainda que realizado minuciosamente gera, no fio, acúmulo de tensões residuais, que prejudicam o resultado do fio como um todo.

Ademais, por ser uma operação manual, é evidentemente impossível que o produto do desempenho seja um fio totalmente retificado, isento de deformações residuais. Tais fatores, em conjunto, levaram não só ao escorregamento de alguns fios após o início do tracionamento efetuado no ensaio, como também, em alguns casos, retardaram o início da deformação elástica do fio, uma vez que a tensão aplicada inicialmente foi absorvida pelo fio de modo a realinhá-lo.

Além disso, por ser manual, tal procedimento não pode ser repetido com exatidão, gerando tensões residuais distintas em cada fio. Assim, as amostras apresentaram não só comportamentos como também resultados distintos.

Em decorrência disso, optou-se por analisar os dados oriundos diretamente da máquina, utilizando novos métodos para a plotagem do gráfico, bem como para a determinação das curvas de tensão e deformação. Foram computados então em colunas de uma planilha do Excel dados de tempo (s), deformação (mm) e força (N), para cada uma das amostras dos sete lotes ensaiados.

Vale ressaltar que os ensaios foram todos feitos conforme o padrão, e as fraturas tiveram aspecto dúctil verificado a olho nu, conforme pode ser verificado nas imagens abaixo.



*Figura 17: corpos de prova após ensaio de tração, referentes ao lote 1A*



*Figura 18: detalhe da fratura dúctil*

Tais fatores serão melhor ilustrados durante a análise dos resultados, a seguir.

### 3.4 Testes de hipóteses

Os resultados obtidos nos testes acima foram analisados com o auxílio do software Minutab, de modo a verificar uma possível correção entre eles. A ferramenta de teste de hipóteses foi utilizada, a saber.

Uma hipótese é uma afirmação sobre a distribuição e/ou os parâmetros de uma população. O objetivo de um teste de hipóteses é decidir, com base na informação contida numa amostra retirada da população em causa, qual de duas hipóteses complementares é verdadeira. As duas hipóteses complementares de um problema de teste de hipóteses são designadas por hipótese nula e hipótese alternativa, denotadas por  $H_0$  e  $H_1$ , respectivamente. As hipóteses estatísticas são avaliadas através de procedimentos que utilizam a informação contida nos dados, qualificando a consistência dos mesmos com a decisão sobre a (não) rejeição da hipótese nula.

No presente trabalho os Testes de Hipóteses foram utilizados para a comparação entre médias de diferentes lotes de amostras.

## Capítulo 4 - METODOLOGIA

Conforme descrito acima, as curvas fornecidas pelo sistema operacional foram desconsideradas, e as colunas de dados aferidas pelo equipamento foram utilizadas como base para a análise dos resultados. Segue então, a relação de dados tida em mãos após a realização dos ensaios.

Dados aferidos na máquina:

- T: tempo, em segundos;
- $\epsilon$ : Deformação, em milímetros;
- F: Força instantânea aplicada, em Newtons;

Dados medidos pelo operador:

- $L_0$ : Comprimento inicial do fio, em milímetros;
- $A_0$ : Área da seção transversal inicial do fio, em milímetros quadrados

Seguiu-se então o cálculo dos parâmetros necessários para a análise posterior, tal como segue.

### 4.1 As curvas de tensão versus deformação de engenharia

Para cada amostra, foram feitos os seguintes cálculos:

- $\epsilon_E$ : Deformação de Engenharia [%]

$$\epsilon_E = \frac{\epsilon}{L_0}$$

- $\sigma$ : Tensão [MPa]

$$\sigma_E = \frac{F}{A_0}$$

- $\epsilon_v$ : Deformação Verdadeira [%]

$$\epsilon_v = \ln(1 + \epsilon_E)$$

- $\sigma_v$ : Tensão Verdadeira [MPa]

$$\sigma_v = \epsilon_v(1 + \epsilon_E)$$

Com base nos mesmos, foram então plotados os gráficos da curva de tensão versus deformação de engenharia, bem como a de deformação verdadeira versus tensão verdadeira.

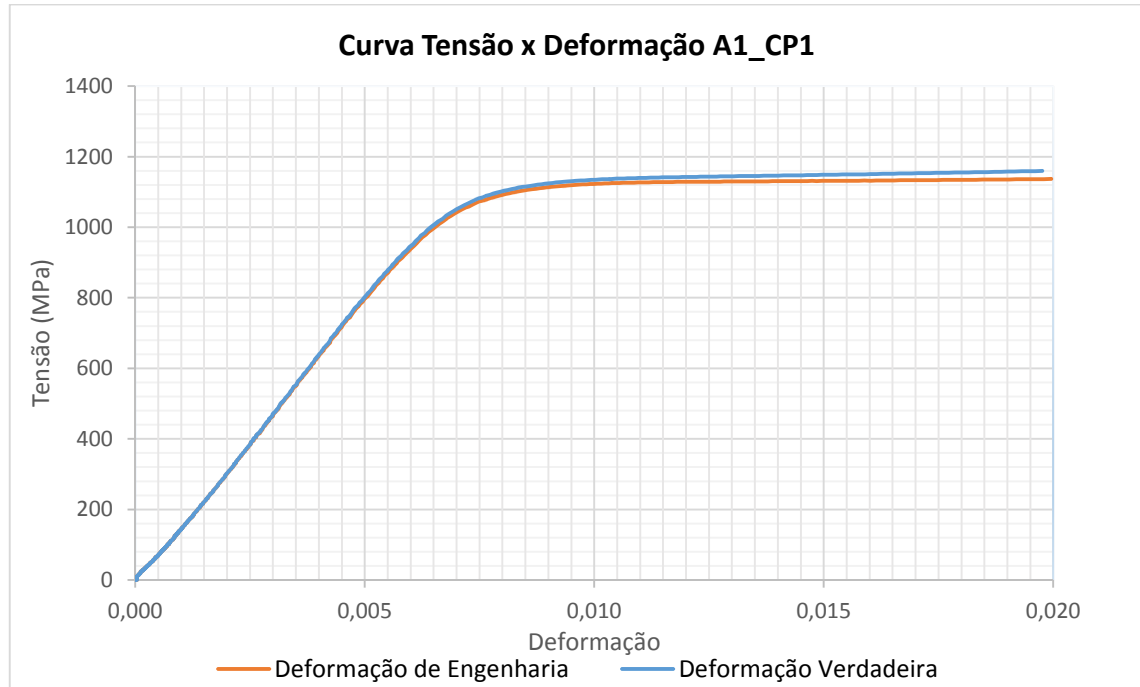


Gráfico 1: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia e Verdadeira

## 4.2 Determinação do Módulo de Elasticidade

De acordo com a literatura, para aços carbono o módulo de elasticidade é aproximadamente 210 GPa. Porém, tomando-se esse valor como aplicável, a reta de aproximação muito se distancia das curvas plotadas, evidenciando que tal valor de módulo de elasticidade não é aplicável ao material em questão.

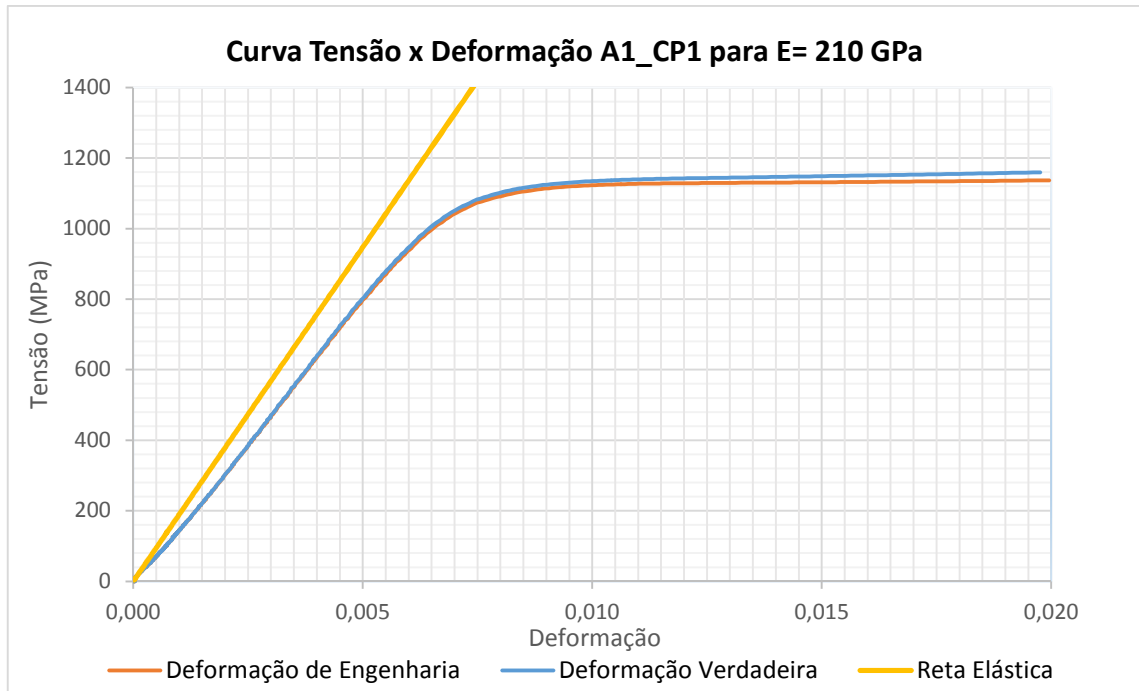


Gráfico 2: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia e Verdadeira

De modo a obter um valor coerente para tal parâmetro, foi calculado o módulo de elasticidade instantâneo das amostras, como segue:

#### 4.3 Determinação do Módulo de Elasticidade pelo Método Gráfico

De acordo com a literatura, para aços carbono o módulo de elasticidade é aproximadamente 210 GPa. Porém, tomando-se esse valor como aplicável, a reta de aproximação muito se distancia das curvas plotadas, evidenciando que tal valor de módulo de elasticidade não é aplicável ao material em questão.

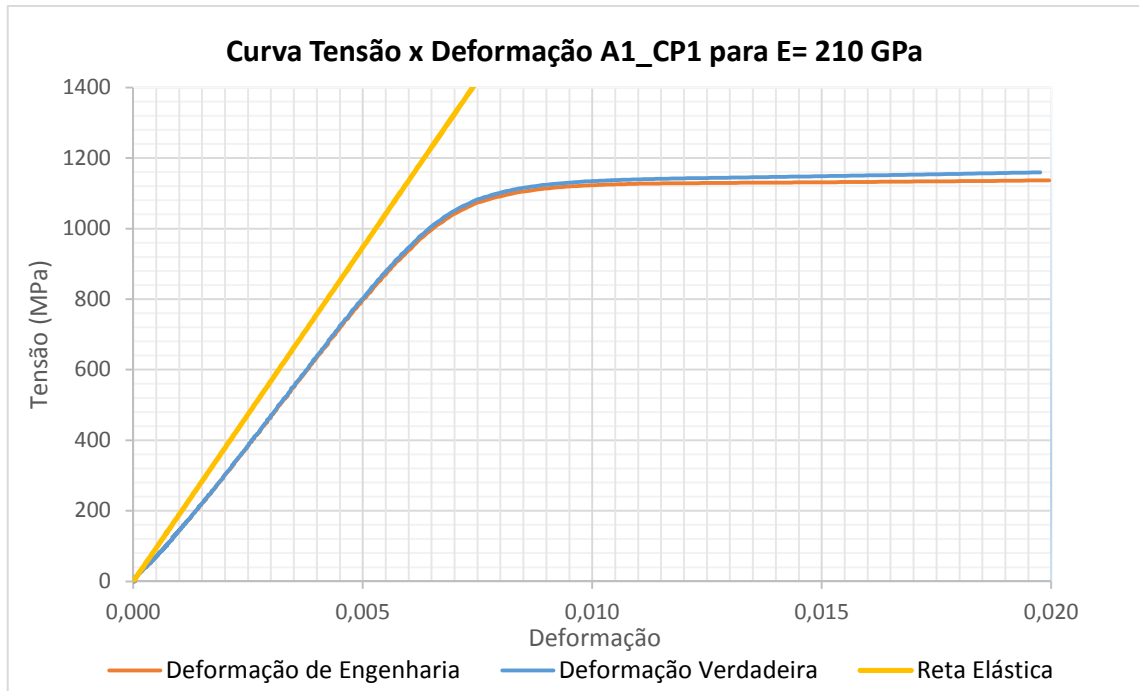


Gráfico 3: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia e Verdadeira

De modo a obter um valor coerente para tal parâmetro, foi calculado o módulo de elasticidade pelo método gráfico, que consiste em um conjunto de passos abaixo especificados, a saber.

### Passo 01: Identificação dos pontos

Com base no gráfico Tensão versus Deformação referente à amostra em questão, identifica-se, graficamente, a parte da região elástica na qual seu comportamento é aproximadamente retilíneo, bem como os valores de tensão e deformação verdadeiros de engenharia referentes aos mesmos.

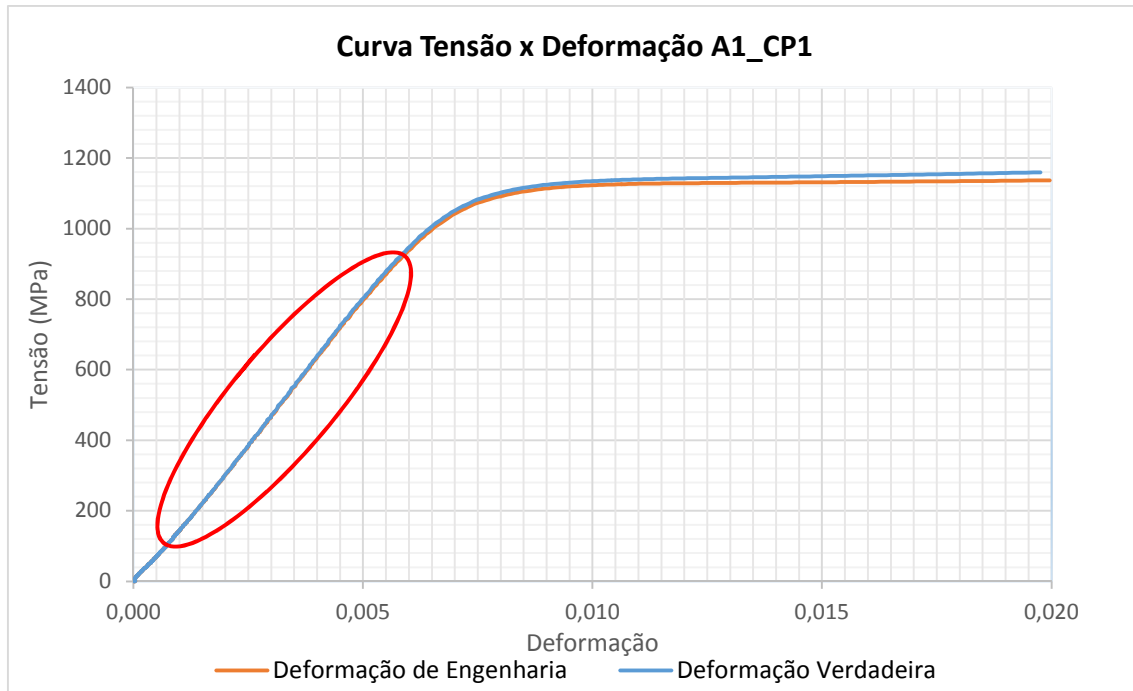


Gráfico 4: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia e Verdadeira indicando a região elástica onde o formato da curva se aproxima de uma reta

## Passo 02: Plotagem da curva

Plota-se, então, uma nova curva Tensão versus Deformação Verdadeira englobando apenas a região em questão.

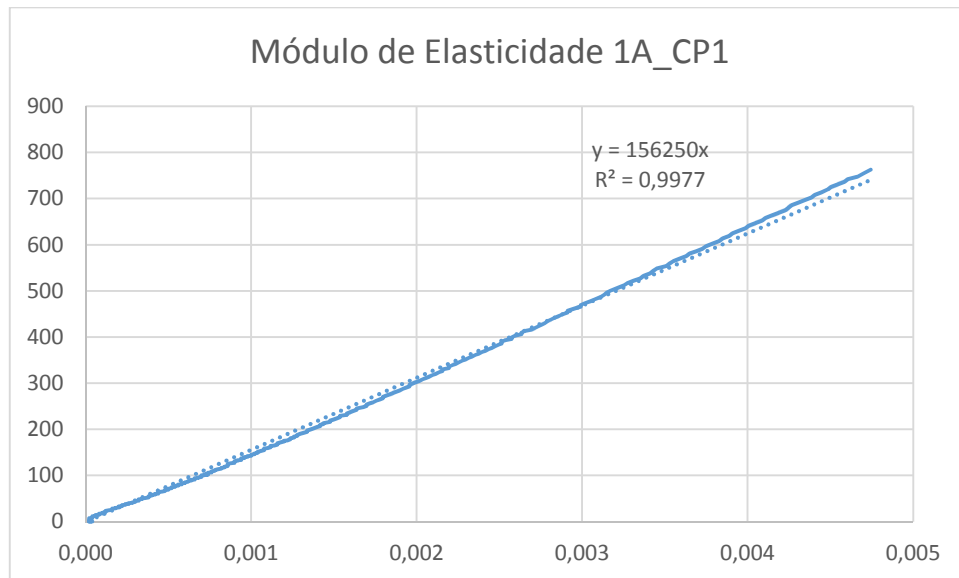


Gráfico 5: Região elástica da curva tensão versus deformação verdadeira

Aproximando-a então por uma reta que intercepta a origem, obtemos uma equação do tipo:

$$y = a * x$$

Onde o valor de  $\alpha$  equivale ao Módulo de Elasticidade da amostra, uma vez que este corresponde, matematicamente, à inclinação da reta tensão versus deformação.

O método foi então aplicado às curvas referentes a todas as amostras mas, novamente, apenas aquelas retiradas diretamente do spool (lotes 1A e 4A) apresentaram um comportamento razoavelmente uniforme, permitindo sua utilização no cálculo do módulo de elasticidade.

Segue então a tabela com os valores encontrados:

| Amostra      | Módulo de Elasticidade (GPa) |
|--------------|------------------------------|
| 1A_01% CP1   | 156,25                       |
| 1A_01% CP2   | 175,744                      |
| 1A_01% CP3   | 150,785                      |
| 1A_01% CP4   | 173,554                      |
| 1A_01% CP5   | 176,633                      |
| 4A_01% CP1   | 171,412                      |
| 4A_01% CP2   | 167,488                      |
| 4A_01% CP3   | 164,331                      |
| 4A_01% CP4   | 159,619                      |
| 4A_01% CP5   | 158,712                      |
| <b>Média</b> | <b>165,4528</b>              |

Tabela 3: valores do Módulo de Elasticidade calculados pelo método gráfico para as amostras dos lotes 1A e 4<sup>a</sup>

#### 4.4 Determinação do Coeficiente de Encruamento pelo Método Gráfico

De raciocínio análogo ao item anterior, o Coeficiente de Encruamento foi calculado numa análise do gráfico Tensão versus Deformação.

##### **Passo 01: Identificação dos pontos**

Com base no gráfico Tensão versus Deformação referente à amostra em questão, identifica-se, graficamente, a parte da região plástica na qual seu comportamento tem variação aproximadamente uniforme, bem como os valores de tensão e deformação verdadeiros de engenharia referentes aos mesmos.

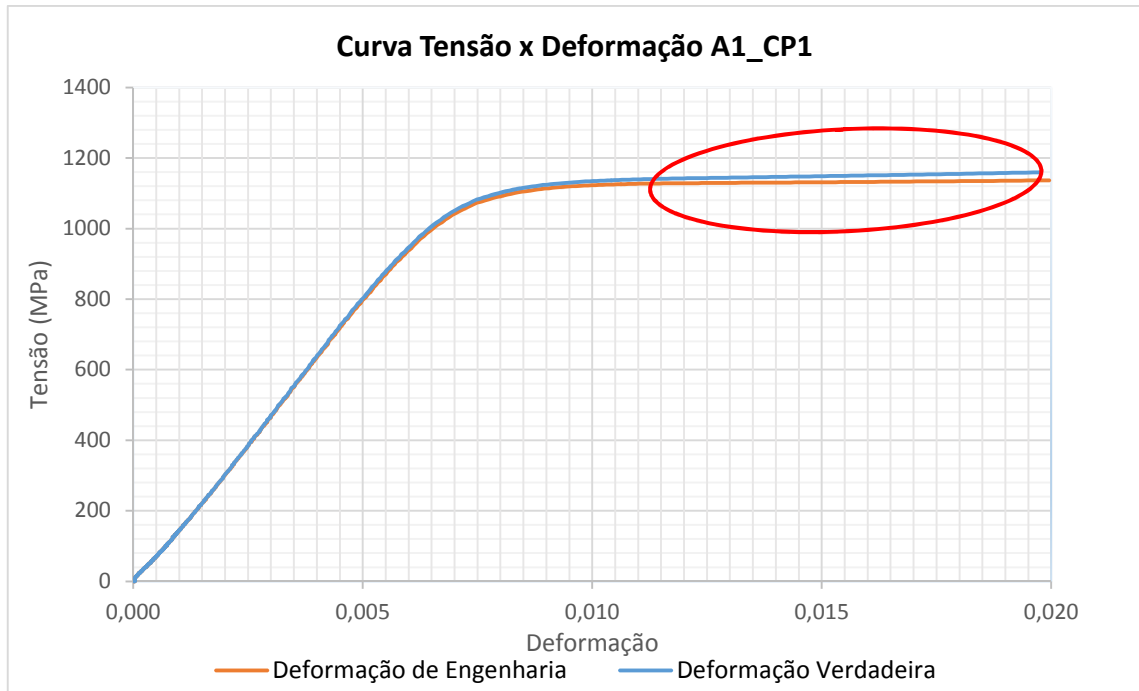


Gráfico 6: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia e Verdadeira indicando a região plástica onde o formato da curva se aproxima de uma reta

## Passo 02: Plotagem da curva

Plota-se, então, uma nova curva Tensão versus Deformação Verdadeira englobando apenas a região em questão.

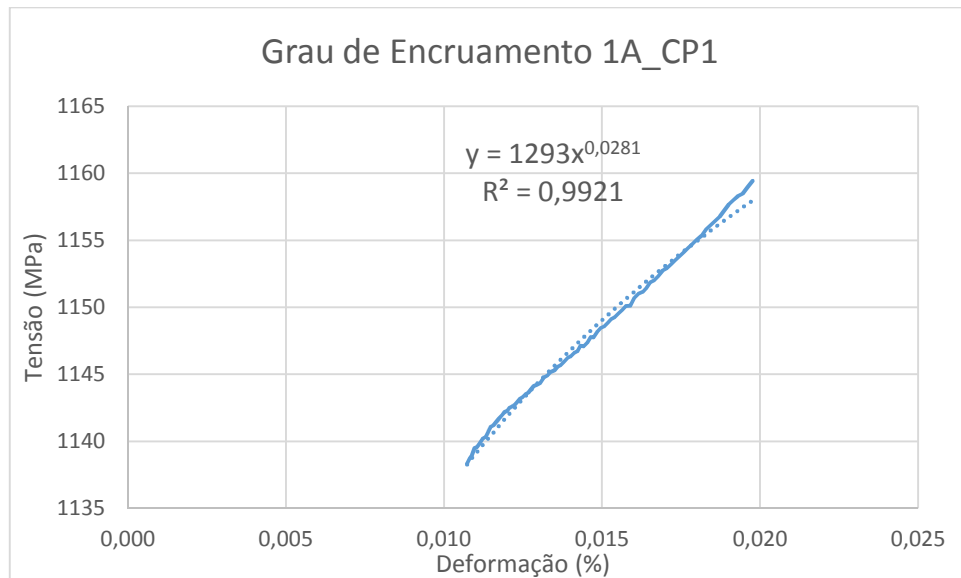


Gráfico 7: Região plástica da curva tensão versus deformação verdadeira

A curva plotada foi aproximada por uma equação de regressão de potência, na forma

$$y = b * x^a$$

onde *b* corresponde ao coeficiente de resistência (K), e *a* ao coeficiente de encruamento (n) referente à amostra.

4.5 Testes de hipótese para comparação das médias

A fim de comparar as médias de alguns lotes, fez-se alguns Testes de Hipóteses segundo a teoria listada no tópico 3.4. Estes testes foram realizados com o auxílio do software Minitab. O software possui uma interface amigável que auxilia na obtenção dos resultados. Ao final de cada análise, obtém-se o relatório mostrado na Figura 19.

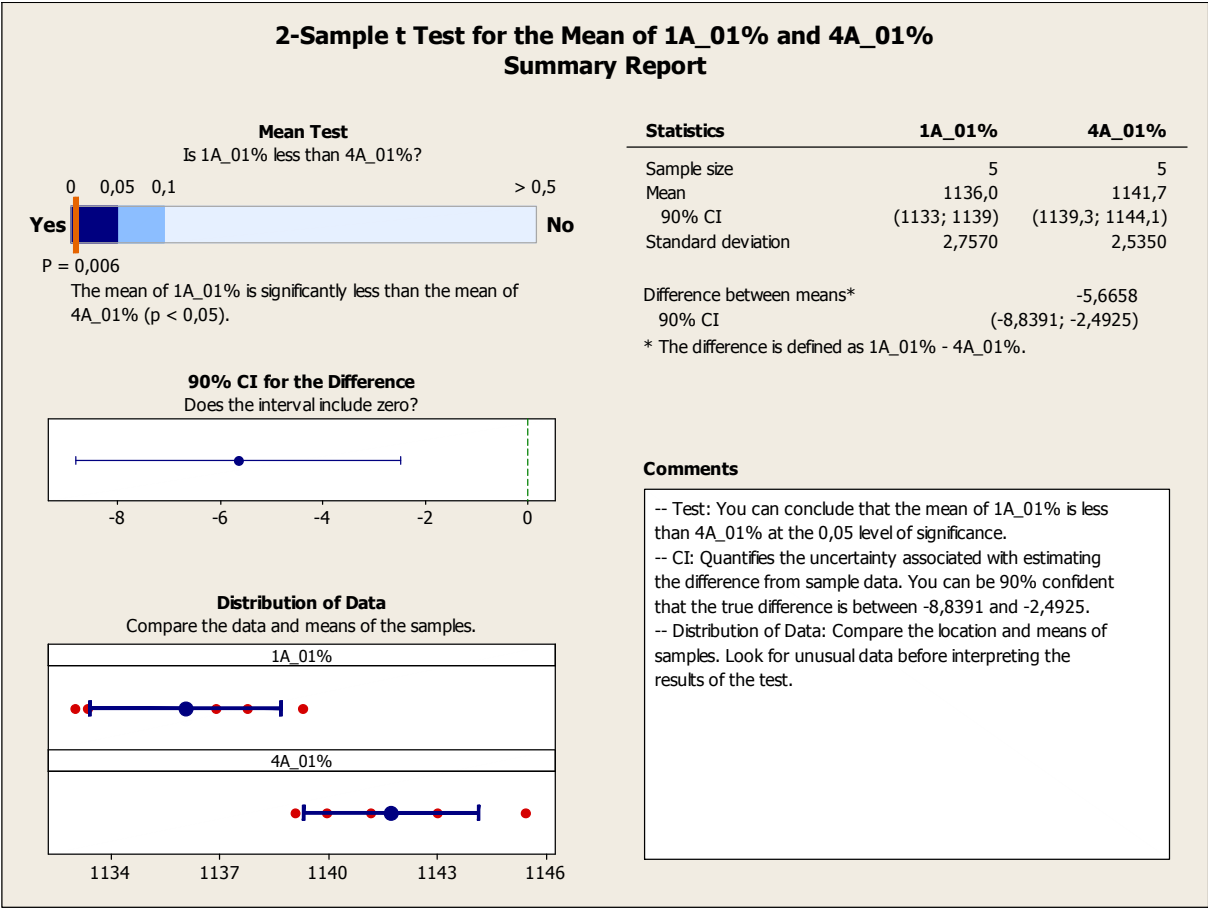


Figura 19: relatório do teste de hipótese entre dois lotes genéricos

A parte superior esquerda da figura é o resultado do teste e mostra, neste caso, que uma média é de fato menor que a outra. A parte superior direita mostra uma descrição

dos dados analisados e uma estimativa estatística da diferença entre as médias. A parte inferior esquerda traz uma ilustração da distribuição de cada amostra e permite uma avaliação visual da diferença entre elas. Por fim, a parte inferior direita lista as conclusões do Teste de Hipótese.

## Capítulo 5 - RESULTADOS

Apesar da norma para especificação dos fios alertar para a necessidade de seu limite de escoamento estar acima de 1200 MPa, os resultados obtidos com base nos cálculos descritos no item anterior são tomados de forma qualitativa. Objetiva-se comparar os valores de limite de escoamento obtidos levando em conta que são resultantes dos processos aos quais o fio foi submetido e, desse modo, verificar variações no limite de escoamento associadas à causa ou ausência do efeito Bauschinger em questão.

Com base nisso, foram definidas as seguintes comparações:

- Ao longo do processo como um todo, desde a retirada do spool à condição de armagem;
- Antes e após a chicanagem;
- Antes e após a armagem;
- De acordo com o raio de curvatura proporcionado pela localização do fio no spool.

Cada um dos pontos listados acima será discutido a seguir.

### 5.1 Variações no limite de escoamento ao longo do processo

Para que o limite de escoamento fosse avaliado ao longo dos processos, sem a possível influência de deformações plásticas oriundas da localização mais interna do fio no spool, as amostras analisadas nesse tópico são provenientes da parte externa do spool.

De tal modo, foram comparados os resultados das amostras referentes aos lotes 1A (parte mais externa do spool, assim que é desembalado), 1B (parte mais externa do spool após passar pelo processo de bobinagem) e 5 (parte mais externa do spool após a armagem).

Pode-se notar, a priori, uma grande variação no formato da curva de tensão versus deformação ao longo do processo.

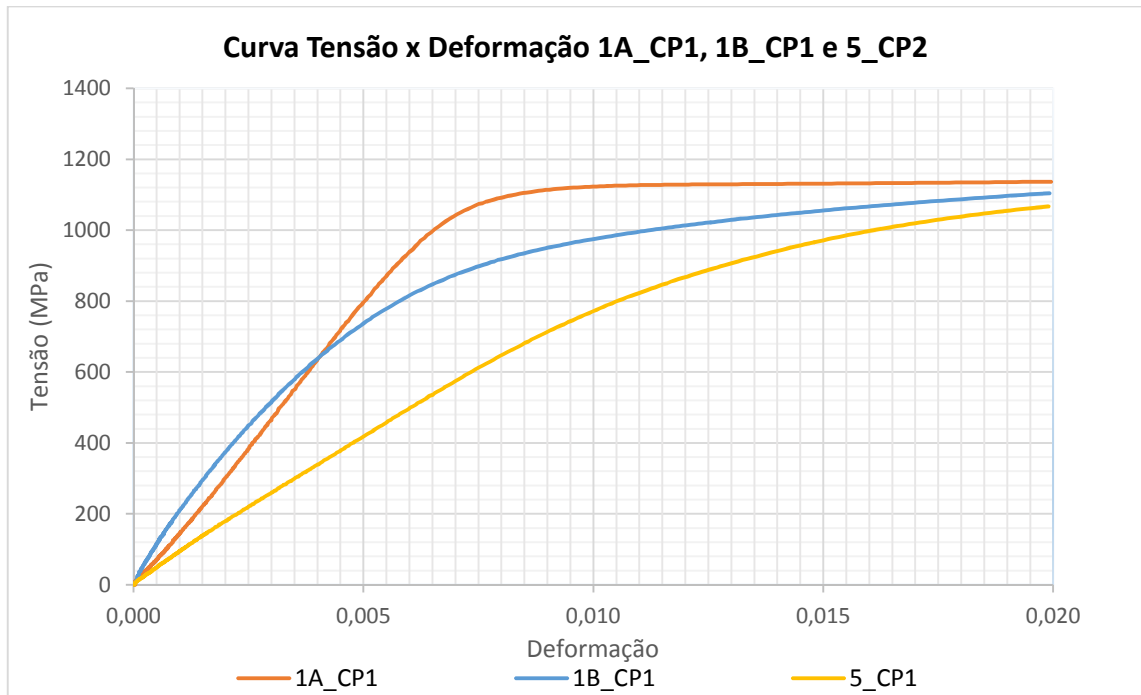


Gráfico 8: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia para os corpos de prova 1A\_CP1, 1B\_CP1 e 5\_CP2

De acordo com JANDERA E MACHACEK, a perda do formato de curva tensão versus deformação ideal se deve às tensões residuais no fio. Foi comprovado matematicamente que, à medida em que a concentração de tensões oriundas do processo aumenta em um material, sua curva de tensão versus deformação tende a perder o “joelho”, ou seja, o raio de curvatura aumenta a ponto da transição entre as regiões de deformação elástica e plástica se tornar imperceptível à medida em que o material é tensionado.

Em seguida, tomemos as médias dos limites de escoamento obtidos nas cinco amostras de cada lote. Os valores estão explícitos na tabela abaixo:

|               | Retirada do spool  | Após a chicanagem  | Após a puxada      |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|               | 1A_01%             | 1B_01%             | 5_01%              |
| CP1           | 1133,0125          | 1049,1670          | 997,6721           |
| CP2           | 1139,2585          | 1060,0182          | 1055,1046          |
| CP3           | 1133,3404          | 1074,6370          | 1048,0045          |
| CP4           | 1137,7385          | 1072,0958          | 1088,8938          |
| CP5           | 1136,8805          |                    | 1058,3775          |
| <b>Média</b>  | <b>1136,0461</b>   | <b>1063,9795</b>   | <b>1049,6105</b>   |
| <b>Desvio</b> |                    |                    |                    |
| <b>Padrão</b> | <b>2,465891467</b> | <b>10,18033269</b> | <b>29,49711891</b> |

Tabela 4: limite de escoamento a 1% calculado das amostra dos lotes 1A, 1B e 5.

Numa análise estatística dos valores acima descritos, é possível afirmar, com 95% de certeza que, ainda com uma amostragem relativamente pequena, há diferença considerável entre as médias encontradas. Essa análise é mostrada na Figura 20.

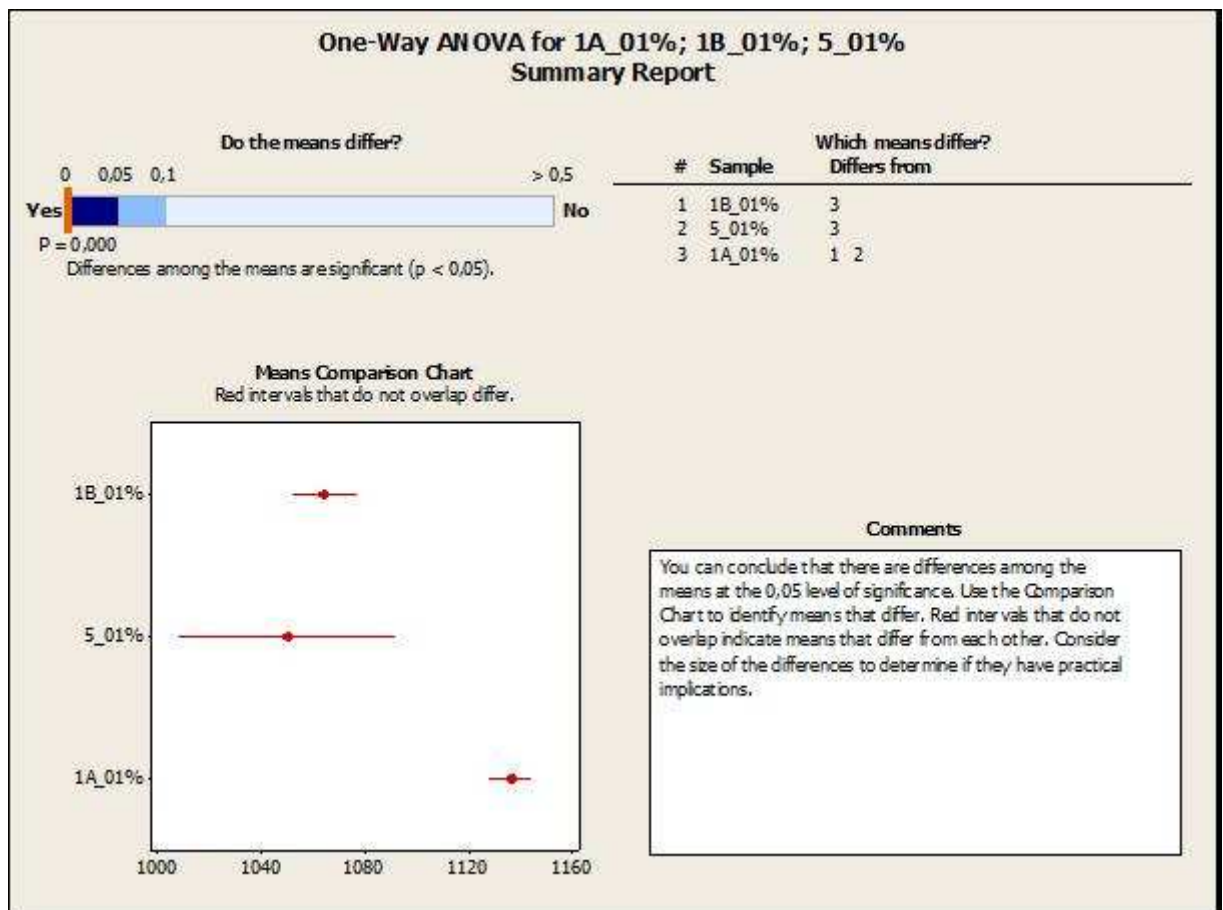


Figura 20: relatório do teste de hipótese entre os lotes 1A, 1B e 5.

Analizando o gráfico de comparação da Figura 20, percebe-se que a média do lote 1A difere dos outros dois. Entretanto, ela não permite quantificar essa diferença em uma comparação com mais de dois lotes.

Observando o gráfico com as médias dos três lotes, fica evidente que, ao longo dos processos de bobinagem e armagem, ocorre uma queda no limite de escoamento.

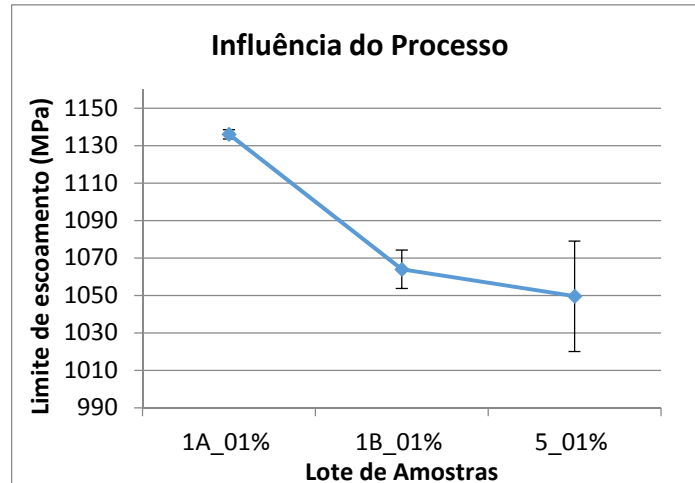


Gráfico 9: gráfico comparativo das médias e dos limites de escoamento a 1% dos lotes 1A, 1B e 5

Entre o material retirado diretamente do spool e após a bobinagem, nota-se uma redução de 6,34%, ao passo que entre a bobinagem e a armagem essa redução é de 1,35%, o que equivale a uma queda de 7,69% no limite de escoamento ao longo do processo.

Já o Coeficiente de Encruamento aumenta significativamente. Apenas antes e após o processo de bobinagem, verifica-se um aumento de 586,1% no coeficiente de encruamento, enquanto na armadora é de apenas 11,54%.

|              | 1A_01%         | 1B_01%         | 5_01%          |
|--------------|----------------|----------------|----------------|
| CP1          | 0,0281         | 0,1966         | 0,3465         |
| CP2          | 0,0336         | 0,2349         | 0,2172         |
| CP3          | 0,0327         | 0,2126         | 0,2509         |
| CP4          | 0,0309         | 0,2193         | 0,1744         |
| CP5          | 0,032          |                | 0,2148         |
| <b>Média</b> | <b>0,03146</b> | <b>0,21585</b> | <b>0,24076</b> |

Tabela 5: coeficiente de resistência calculado para as amostras dos lotes 1A, 1B e 5.

## 5.2 Variações no limite de escoamento durante a bobinagem

De modo a constatar possíveis tensões residuais dados os esforços oscilantes proporcionados pelo conjunto de polias durante o processo de bobinagem, foram comparadas amostras da parte mais interna do spool, antes e após esse processo (4<sup>a</sup> e 4B, respectivamente).

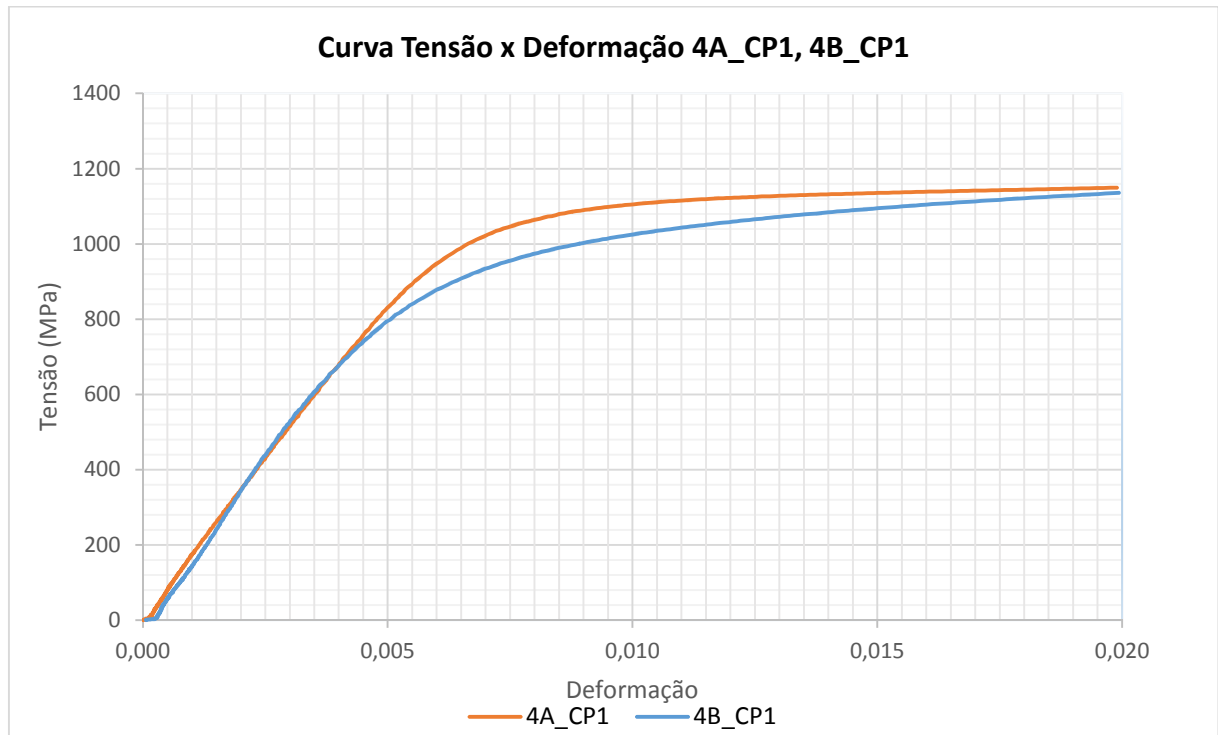


Gráfico 10: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia para os corpos de prova 4A\_CP1, 4B\_CP1

Tomemos as médias de ambos os lotes:

|                      | Retirada do spool  | Após a chicanagem  |
|----------------------|--------------------|--------------------|
|                      | 4A_01%             | 4B_01%             |
| CP1                  | 1141,1560          | 1110,6517          |
| CP2                  | 1145,4166          | 1076,0409          |
| CP3                  | 1139,0771          | 1082,5946          |
| CP4                  | 1142,9711          | 1078,6566          |
| CP5                  | 1139,9387          | 1066,9799          |
| <b>Média</b>         | <b>1141,7119</b>   | <b>1082,9847</b>   |
| <b>Desvio Padrão</b> | <b>2,267408675</b> | <b>14,75613863</b> |

Tabela 6: limite de escoamento a 1% calculado das amostra dos lotes 4A e 4B.

Pela análise estatística realizada, explicitada na tabela abaixo, concluiu-se com 95% de certeza que as médias dos dois lotes de amostras diferem. Dadas a variação e a média, pode-se afirmar, com 90% de certeza, que a diferença entre ambos os lotes está entre 42,814 e 74,641.

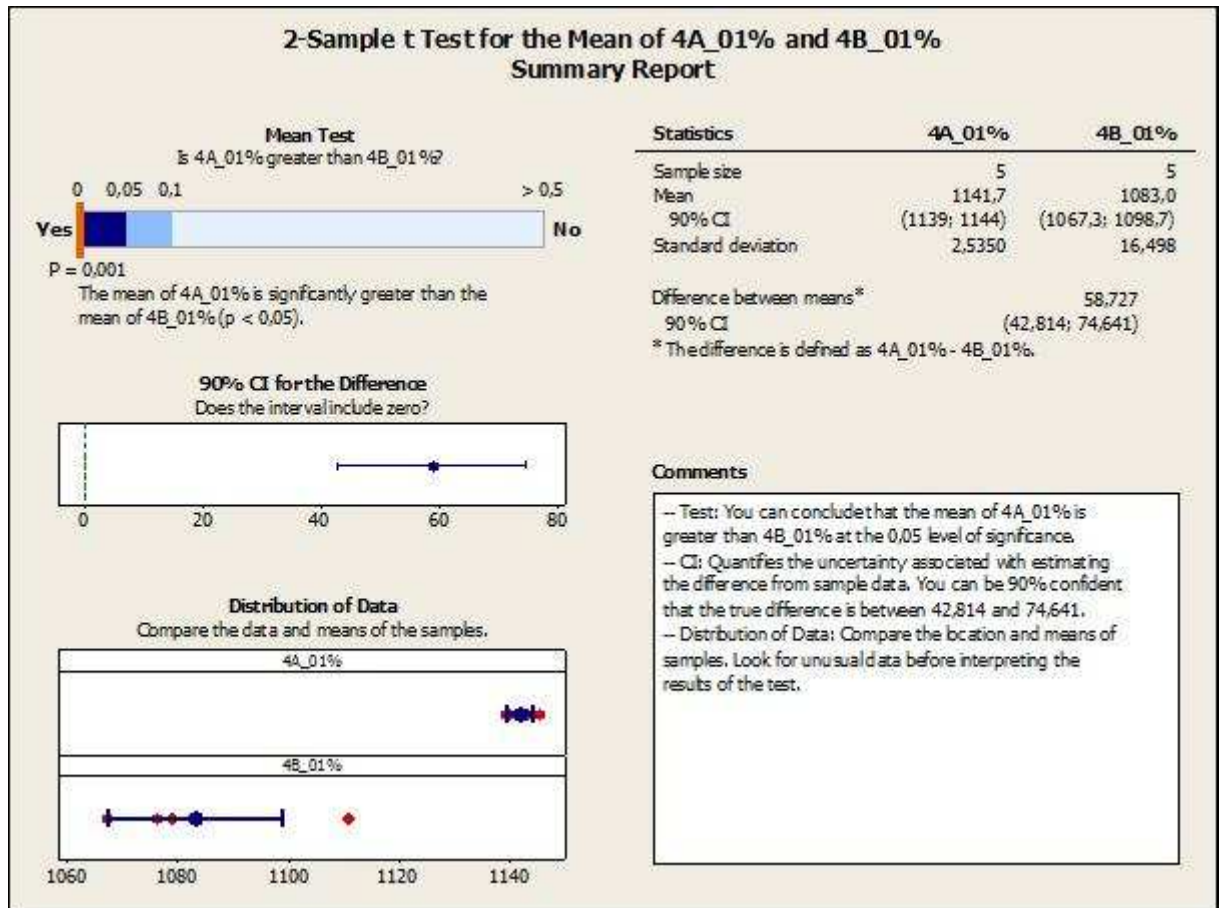


Figura 21 Teste de Hipótese entre os lotes de amostra 4A e 8B

Ou seja, o lote de amostras retirado após o processo de bobinagem tem seu limite de escoamento em torno de 2,67% menor que aquelas retiradas anteriormente a esse processo. Tal queda fica mais evidente na imagem abaixo.

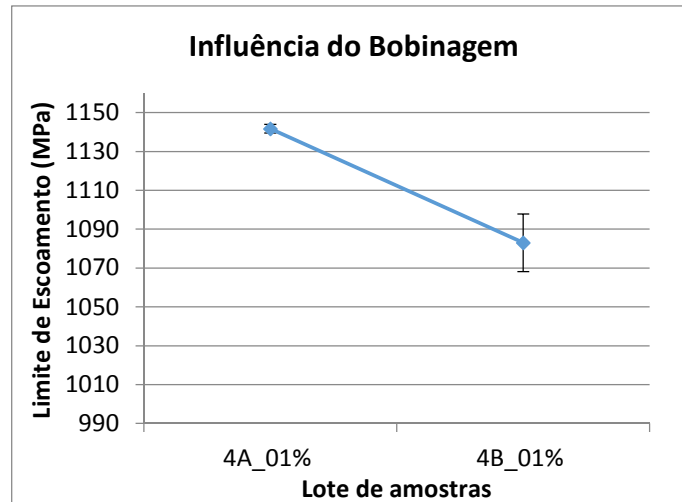


Figura 22: gráfico comparativo das médias e dos limites de escoamento a 1% dos lotes 4A e 4B

Já o coeficiente de encruamento cresceu significativamente ao longo do processo, com um aumento de 233,61% após o processo de bobinagem.

|              | 4A_01%         | 4B_01%        |
|--------------|----------------|---------------|
| CP1          | 0,0603         | 0,1578        |
| CP2          | 0,05           | 0,2051        |
| CP3          | 0,0641         | 0,1992        |
| CP4          | 0,0593         | 0,2114        |
| CP5          | 0,065          | 0,223         |
| <b>Média</b> | <b>0,05974</b> | <b>0,1993</b> |

Tabela 7: coeficiente de resistência calculado para as amostras dos lotes 4A e 4B.

### 5.3 Variações no limite de escoamento devido à armagem

Para a análise do processo de armagem em específico, foram comparadas as amostras extraídas diretamente das bobinas, após o processo de bobinagem, às aquelas obtidas após a puxada na armadora. Foram confrontadas então amostras de partes distintas do spool, a saber: 2 e 6 (amostras correspondentes ao fim da bobina 239 antes e após a armadora, respectivamente); 3 e 7 (amostras correspondentes ao fim da bobina 057 antes e após a armadora).

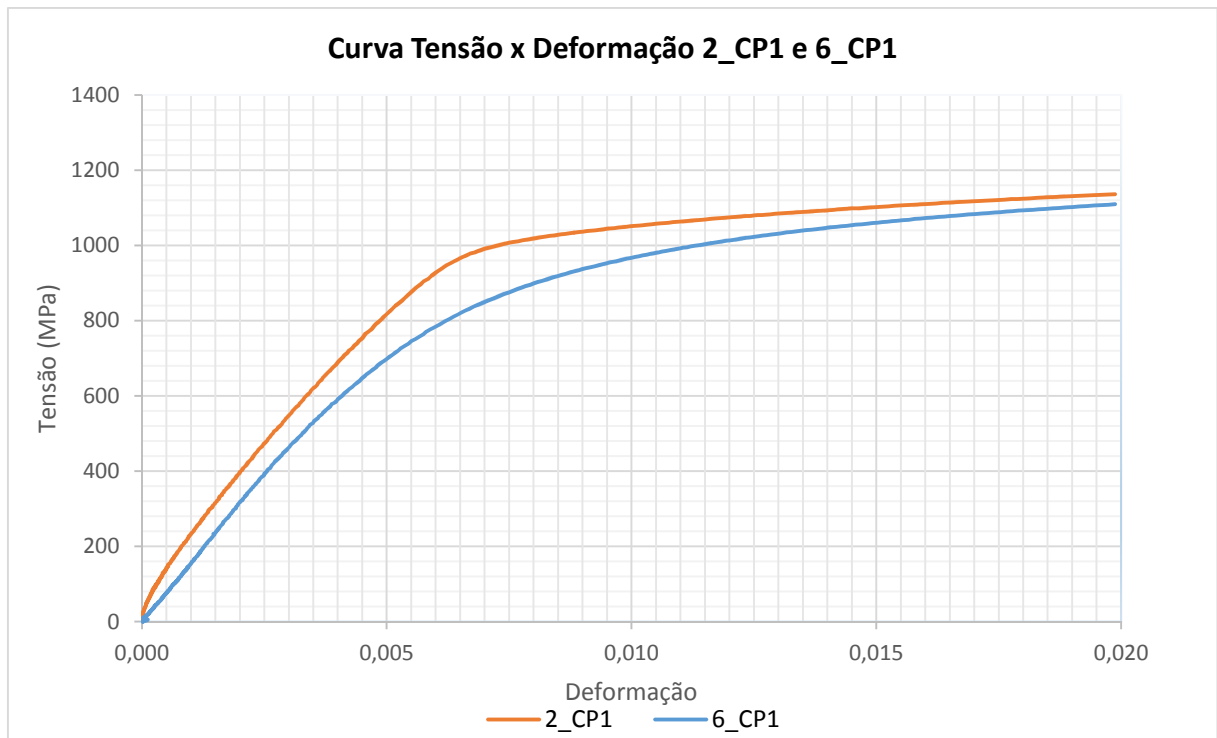


Gráfico 11: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia para os corpos de prova 2\_CP1, 6\_CP1

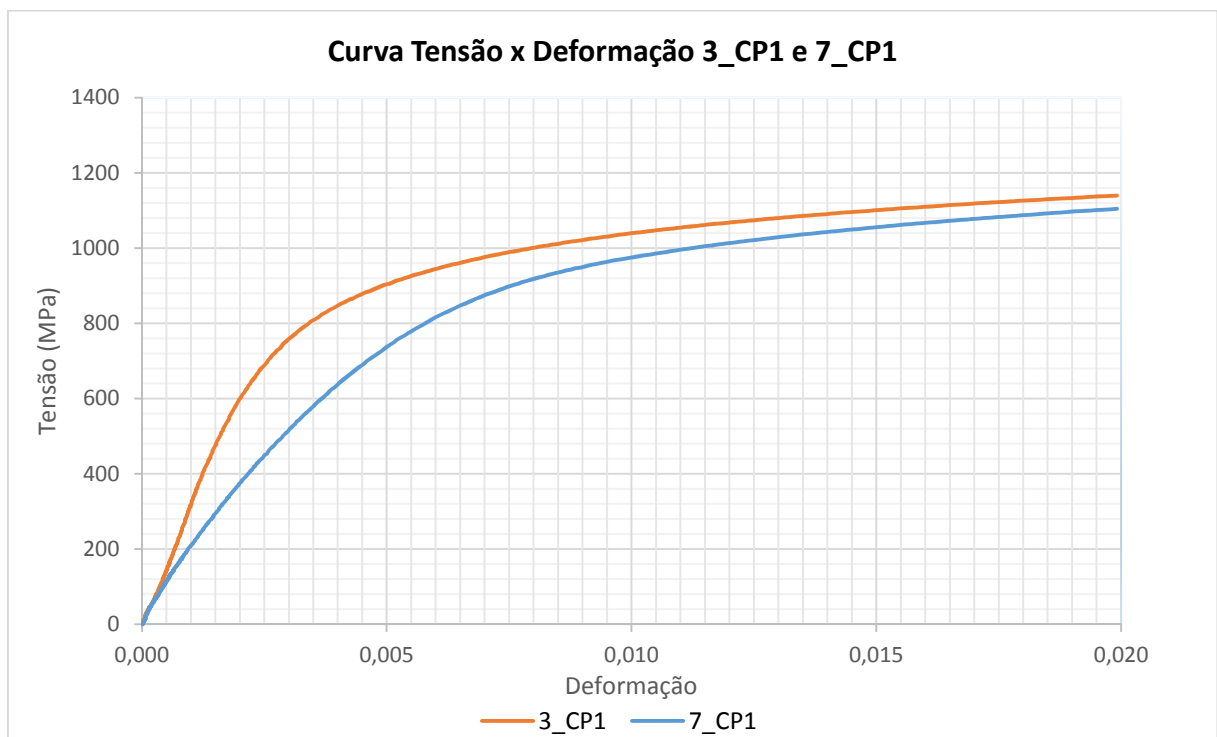


Gráfico 12: curva de Tensão versus Deformação de Engenharia para os corpos de prova 3\_CP1, 7\_CP1

Seguem as médias obtidas:

|               | Após a chicanagem<br>2_01% | Após a puxada<br>6_01% |
|---------------|----------------------------|------------------------|
| CP1           | 1115,1430                  | 1077,8194              |
| CP2           | 1096,0311                  | 1092,0455              |
| CP3           | 1158,2345                  | 1093,8809              |
| CP4           | 1034,1335                  | 1078,6985              |
| CP5           | 1087,7275                  | 1099,2092              |
| <b>Média</b>  | <b>1098,2539</b>           | <b>1088,3307</b>       |
| <b>Desvio</b> |                            |                        |
| <b>Padrão</b> | <b>40,27425904</b>         | <b>8,558183496</b>     |

*Tabela 8: limite de escoamento a 1% calculado das amostra dos lotes 2 e 6.*

|               | Após a chicanagem<br>3_01% | Após a puxada<br>7_01% |
|---------------|----------------------------|------------------------|
| CP1           | 1115,8416                  | 1071,7865              |
| CP2           | 1087,0792                  | 1120,8441              |
| CP3           | 1070,8308                  | 1103,8884              |
| CP4           | 1061,2266                  | 1097,0530              |
| CP5           | 1120,5883                  |                        |
| <b>Média</b>  | <b>1091,1133</b>           | <b>1098,3930</b>       |
| <b>Desvio</b> |                            |                        |
| <b>Padrão</b> | <b>23,66911836</b>         | <b>17,63486108</b>     |

*Tabela 9: limite de escoamento a 1% calculado das amostra dos lotes 3 e 7.*

Para ambos os casos, a análise estatística apontou que não há evidências para afirmar, com 95% de certeza, que as médias diferem. Ademais, dado o grande desvio padrão nos resultados, pode-se afirmar, com 90% de certeza, que a divergência entre as médias está entre -33,965 e 58,881 no primeiro caso, e entre -37,616 e 23,056 no segundo, tornando inviável a comparação entre os dois lotes de amostras em ambas as situações.

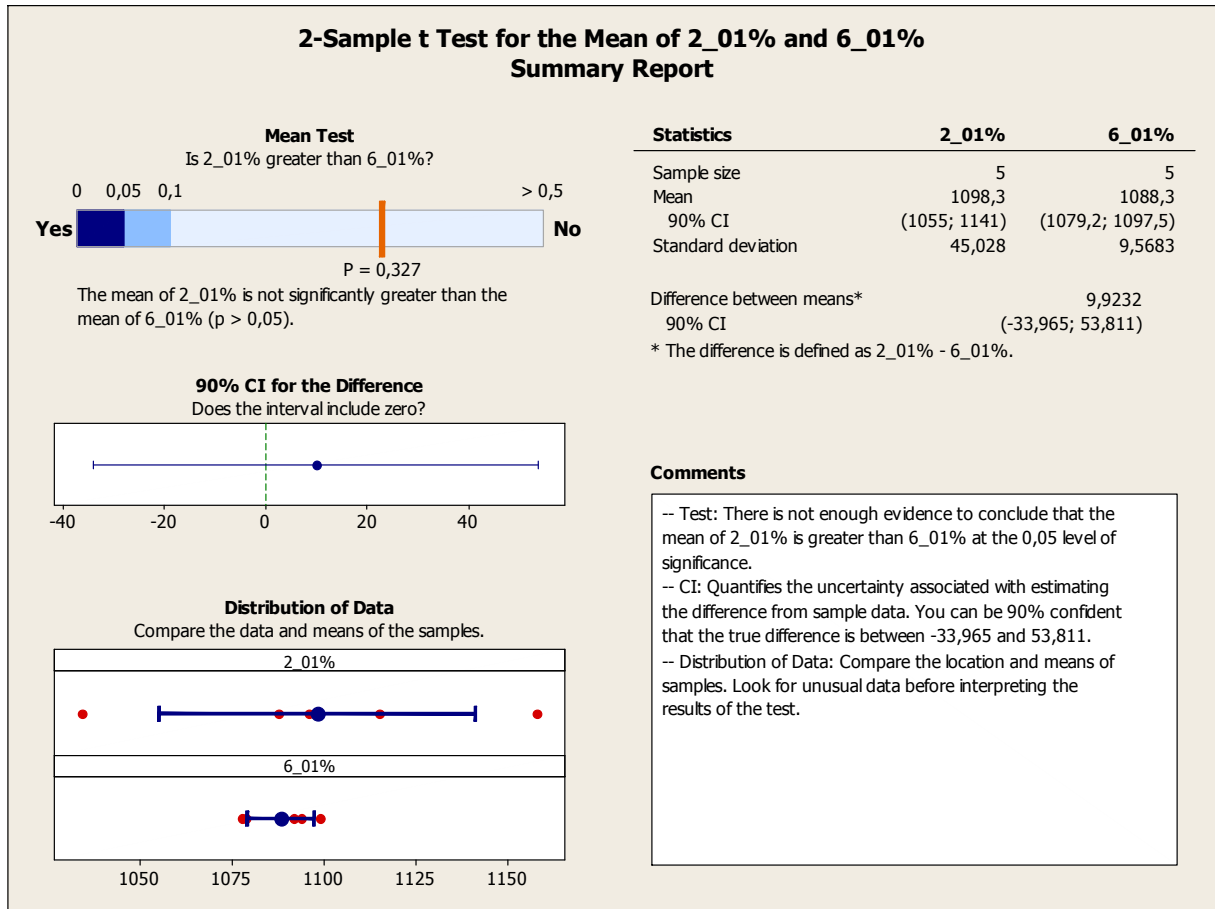


Figura 23: Análise estatística desenvolvida no software Minitab comparando os valores de limite de escoamento equivalente aos lotes 2 e 6

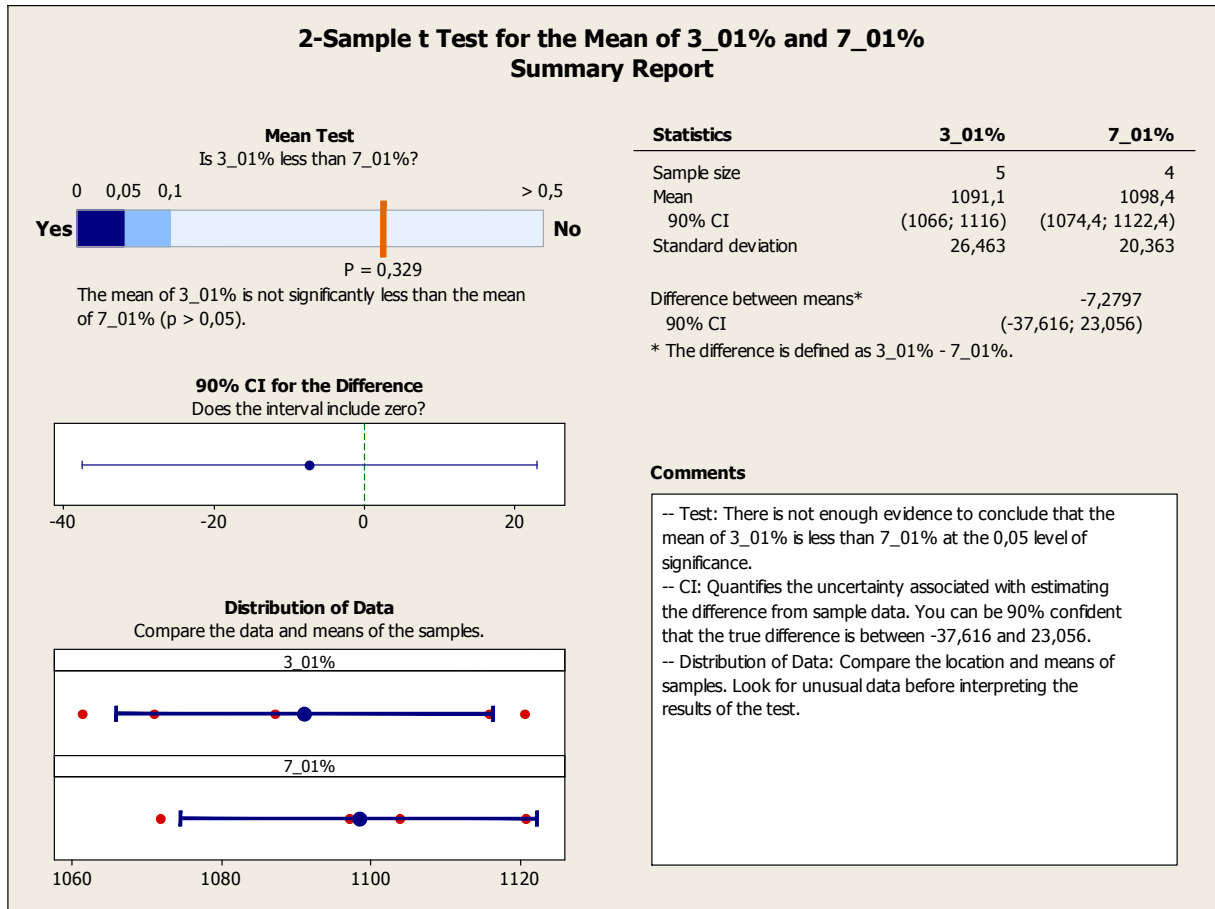


Figura 24: Análise estatística desenvolvida no software Minitab comparando os valores de limite de escoamento equivalente aos lotes 3 e 7

Nas imagens a seguir, pode-se notar que o desvio padrão evidencia a possibilidade de ambas as amostras apresentarem médias equivalentes, não havendo portanto condições de diferenciá-las.

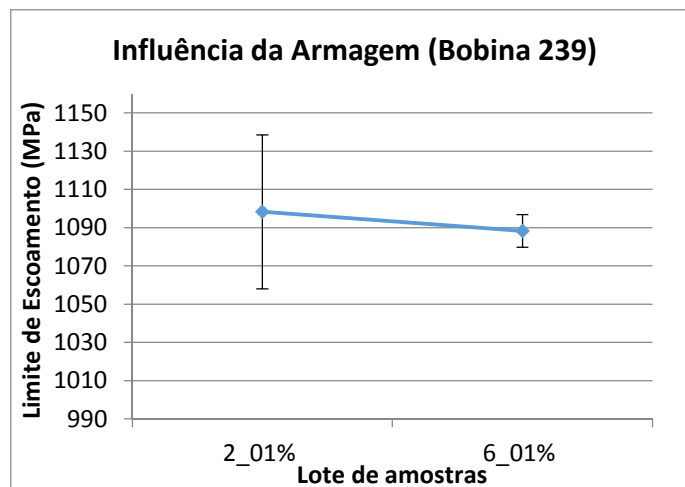


Gráfico 13: Comparação entre as médias das amostras referentes aos lotes 2 e 6, retirados da bobina 239 antes e após a armagem, respectivamente

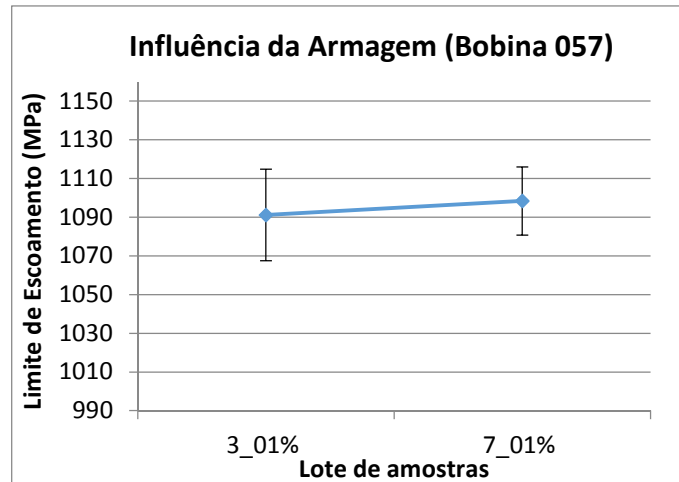


Gráfico 14: Comparação entre as médias das amostras referentes aos lotes 3 e 7, retirados da bobina 057 antes e após a armagem, respectivamente

Já o coeficiente de encruamento apresentou comportamentos divergentes: recrudesceu no primeiro caso e reduziu no segundo.

|              | 2_01%          | 6_01%         |
|--------------|----------------|---------------|
| CP1          | 0,1309         | 0,1971        |
| CP2          | 0,1793         | 0,169         |
| CP3          | 0,0776         | 0,1722        |
| CP4          | 0,2585         | 0,1986        |
| CP5          | 0,1788         | 0,1906        |
| <b>Média</b> | <b>0,16502</b> | <b>0,1855</b> |

Tabela 10: coeficiente de resistência calculado para as amostras dos lotes 2 e 6.

|              | 3_01%         | 7_01%           |
|--------------|---------------|-----------------|
| CP1          | 0,1409        | 0,1895          |
| CP2          | 0,1768        | 0,145           |
| CP3          | 0,1993        | 0,166           |
| CP4          | 0,2125        | 0,181           |
| CP5          | 0,1355        |                 |
| <b>Média</b> | <b>0,1730</b> | <b>0,170375</b> |

Tabela 11: coeficiente de resistência calculado para as amostras dos lotes 3 e 7.

#### 5.4 Variações no limite de escoamento de acordo com o raio de curvatura proporcionado pela localização do fio no spool

É notório, prescindivelmente a qualquer análise estatística, que a deformação plástica nos fios extraídos das regiões mais internas do spool é mais iminente que naquelas mais externas. Isso porque é possível constatar visualmente que as amostras das regiões mais internas estão deformadas a um raio de curvatura menor. Instintivamente, conclui-se que as tensões aumentam à medida em que diminui o raio de curvatura da localização do fio no spool. Cabe, portanto, correlacionar tais circunstâncias a possíveis variações no limite de escoamento.

Foram comparadas então amostras extraídas de diferentes localizações ao longo do spool, à troca de cada bobina, após a bobinagem. Os lotes foram conforme o seguinte: 1B (região mais externa do spool, ao fim da bobina 135), 2 (região intermediária externa do spool, ao fim da bobina 239), 3 (região intermediária interna do spool, ao fim da bobina 057) e 4B (região interna do spool, ao início da bobina 287). As tabelas contendo os valores absolutos de limite de escoamento estão presentes nos tópicos acima.

Contudo, numa análise estatística comparando os quatro lotes, não é possível afirmar com 95% de certeza que as médias são divergentes. Ademais, para um grupo maior que duas amostras, o programa utilizado não fornece a faixa de valores dentro da qual está localizada a diferença entre o limite de escoamento dos lotes.

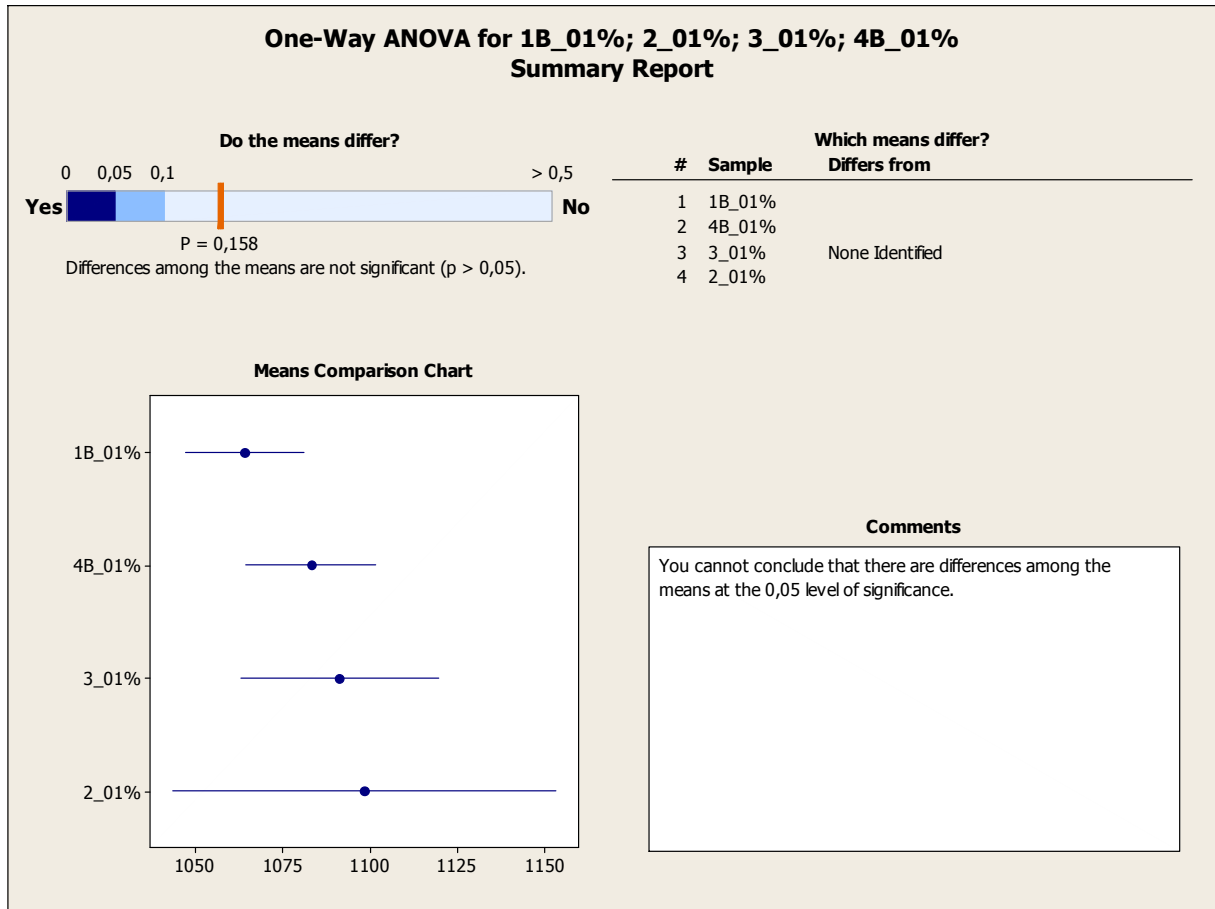


Figura 25: Análise estatística desenvolvida no software Minitab comparando os valores de limite de escoamento equivalente aos lotes 1B, 2, 3 e 4B

No gráfico abaixo é possível verificar que o desvio padrão da média de cada lote é proporcionalmente grande, impossibilitando a comparação entre os mesmos.

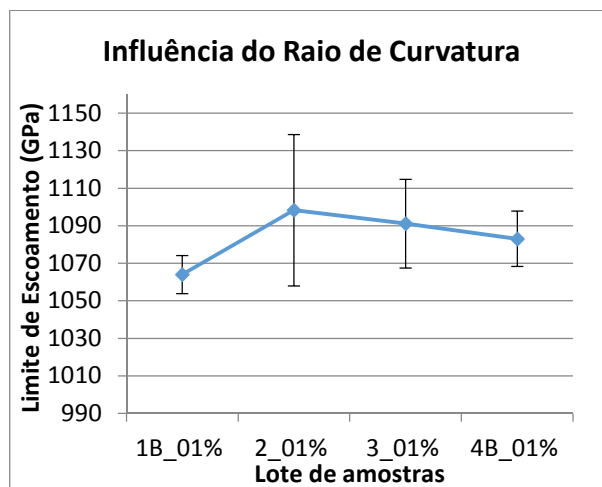


Gráfico 15: Comparação entre as médias das amostras referentes aos lotes 1B, 2, 3 e 4B

Já o coeficiente de encruamento não apresentou variação significativa.

|              | 1B_01%  | 2_01%   | 3_01%  | 4B_01% |
|--------------|---------|---------|--------|--------|
| CP1          | 0,1966  | 0,1309  | 0,1409 | 0,1578 |
| CP2          | 0,2349  | 0,1793  | 0,1768 | 0,2051 |
| CP3          | 0,2126  | 0,0776  | 0,1993 | 0,1992 |
| CP4          | 0,2193  | 0,2585  | 0,2125 | 0,2114 |
| CP5          |         | 0,1788  | 0,1355 | 0,223  |
| <b>Média</b> | 0,21585 | 0,16502 | 0,1730 | 0,1993 |

Tabela 12: coeficiente de resistência calculado para as amostras dos lotes 1B, 2, 3 e 4B.

## Capítulo 6 - CONCLUSÕES

A partir de uma análise crítica dos resultados obtidos acima, pode-se apontar algumas conclusões a respeito da influência do efeito Bauschinger no limite de escoamento do material. Além disso, percebeu-se uma variação do módulo de elasticidade do material em relação às bibliografias existentes. Estas e outras conclusões são explicadas e listadas, a seguir:

Pode-se alegar que há claras evidências da ocorrência do efeito Bauschinger nos fios de aço carbono em questão, pois notou-se significativa diferença entre os limites de escoamento antes e após os processos de bobinagem e armagem (até 7% de diferença nos limites de escoamento), bem como aumento de até 586,1% no coeficiente de encruamento. Além disso, notou-se que, entre os processos de bobinagem e armagem, o processo que mais colabora para este efeito é a bobinagem. Verifica-se, portanto, que o processo de bobinagem é o maior responsável pela queda no limite de escoamento do fio.

A ausência de diferenças significativas entre o limite de escoamento das amostras de diferentes regiões do spool mostra que a posição do fio no spool não altera muito os níveis de deformação plástica, em comparação aos níveis de deformação inseridos durante os processos de bobinagem e armagem.

Alerta-se que o aumento da bitola dos fios utilizados (em decorrência do aumento da profundidade dos reservatórios de petróleo que têm demandando fios cada vez mais resistentes e tubos flexíveis de diâmetros maiores), e a utilização de equipamentos semelhantes para fios de bitola pequena e grande tem exposto fios de bitolas maiores a recrudescentes níveis de deformação plástica durante o processo de fabricação do tubo, em especial durante a bobinagem. Estes níveis de deformação plástica intensificam os efeitos mostrados neste trabalho e podem vir a comprometer os requisitos mecânicos do material. Logo, a fábrica de tubos flexíveis em questão deveria adaptar o processo de fabricação de modo a assegurar que a integridade do fio seja assegurada, por exemplo utilizando bobinas e polias de raios de curvatura maiores para fios de maiores bitolas.

Todavia, é fato que a amostragem dos ensaios é muito baixa, bem como a tão comentada tensão residual proveniente dos desempenos manuais. De modo a ratificar

o resultado acima descrito, os testes e análises subsequentes deveriam ser refeitos com maior amostragem e precisão.

## Capítulo 7 - ESCORÇO BIBLIOGRÁFICO

Tool and Manufacturing Engineers Handbook Desk Edition, W. H. Cubberly, Ramon Bakerjian, Society of Manufacturing Engineers Society of Manufacturing Engineers, 1 de jan de 1989 - 1250 páginas

CALLISTER; W. D. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução. Rio de Janeiro: Editora LTC, 7ª edição, 2008.

SOUZA, S. A. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 5ª edição, 1982.

HETZBERG, R. W. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. United States: John Wiley & Sons, Inc., 4<sup>th</sup> Edition, 1996.

SOLOSANDO, S. G. Simulação Do Processo De Conformação Superplástica Pelo Método Dos Elementos Finitos, 2007

JANDERA, M., E MACHACEK, J., Residual Stress Influence on Material Properties and Column Behavior of Stainless Steel SHS.

FEI, D.; HODGSON, P. Experimental and numerical studies of springback in air v-bending process for cold rolled TRIP steels, Nucl. Eng. and Des., v. 236, p. 1847–1851, 2006.

LEE, K.Y. Tensile properties of different chemical compositions for TRIP assisted multiphase steel for automobile structures, International Journal of Automotive Technology, 2008

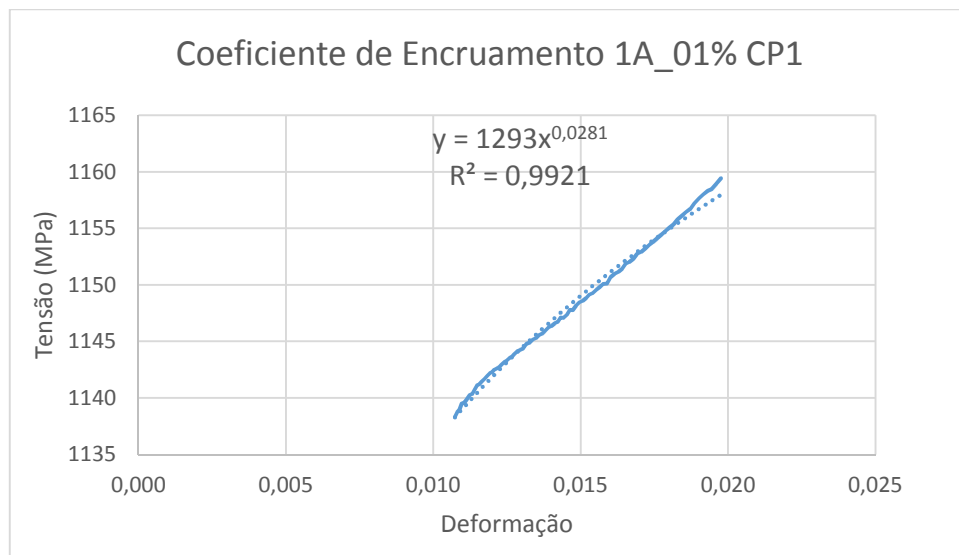
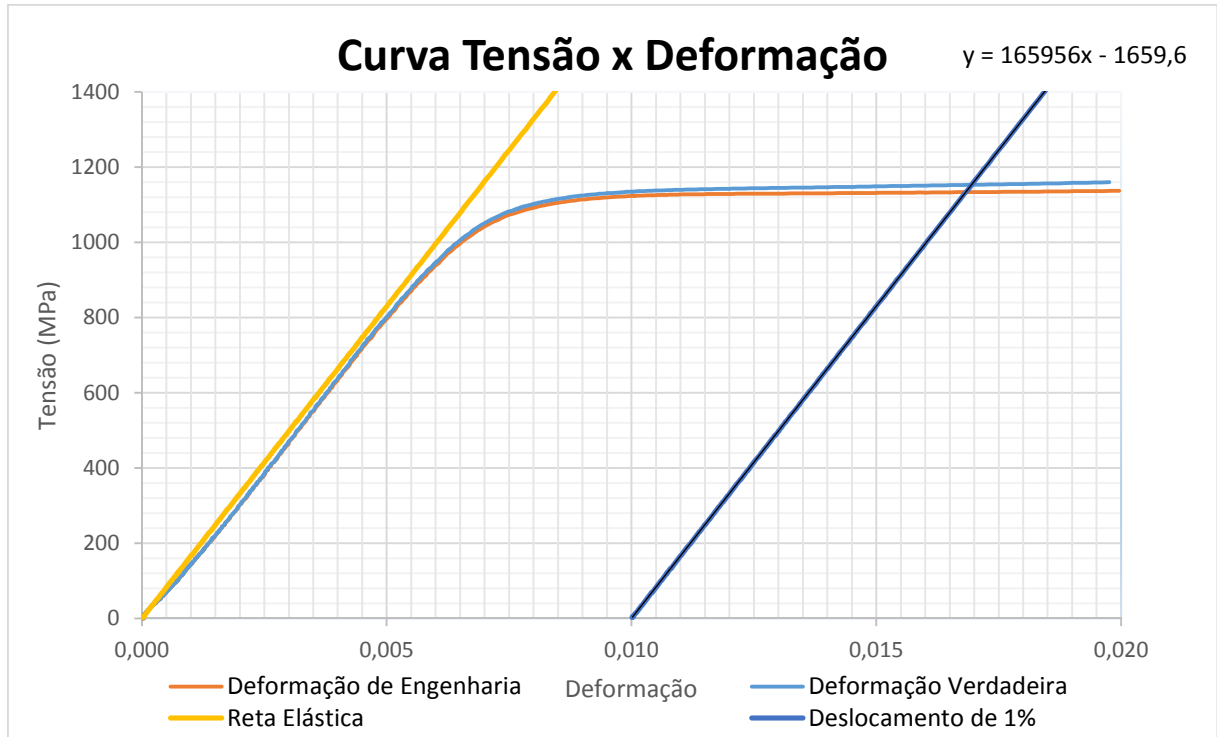
YU U.Y. Microscopic Response of TRIP steels to Prestrain During Plastic Deformation, Journal Of Iron And Steel Research, 2003

ASTM E646. Standard Test Methods for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet. USA: American Society for Testing and Materials, 1998.

ASTM E8M. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]. USA: American Society for Testing and Materials, 1999

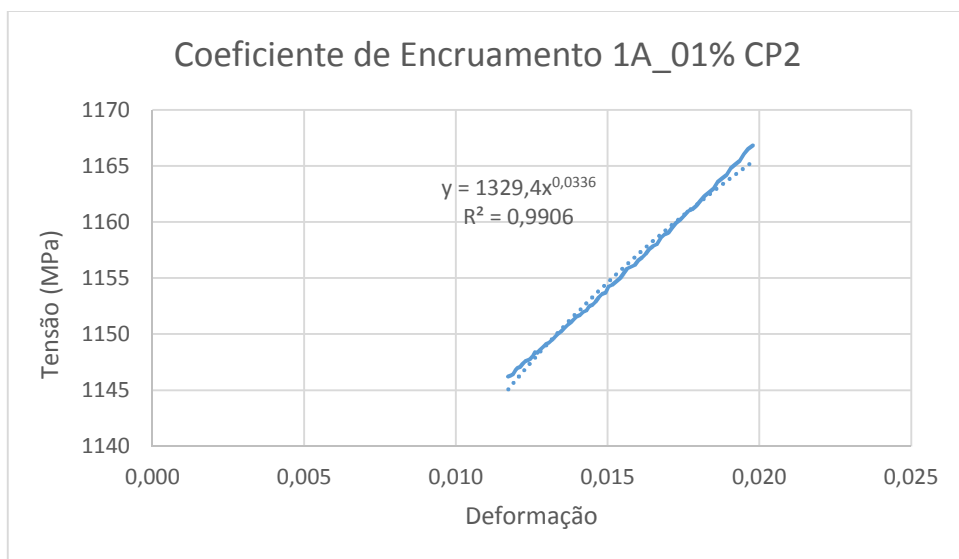
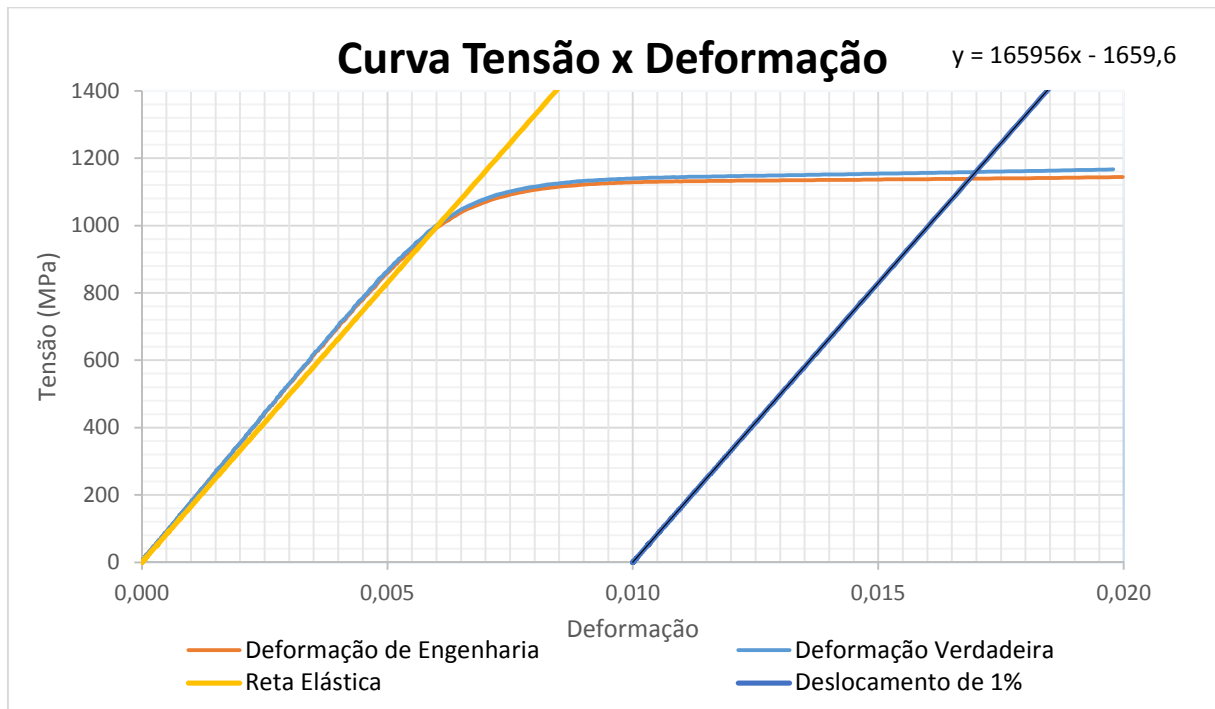
## ANEXO 1

Seguem os gráficos referente à amostra 1A\_01% CP1:



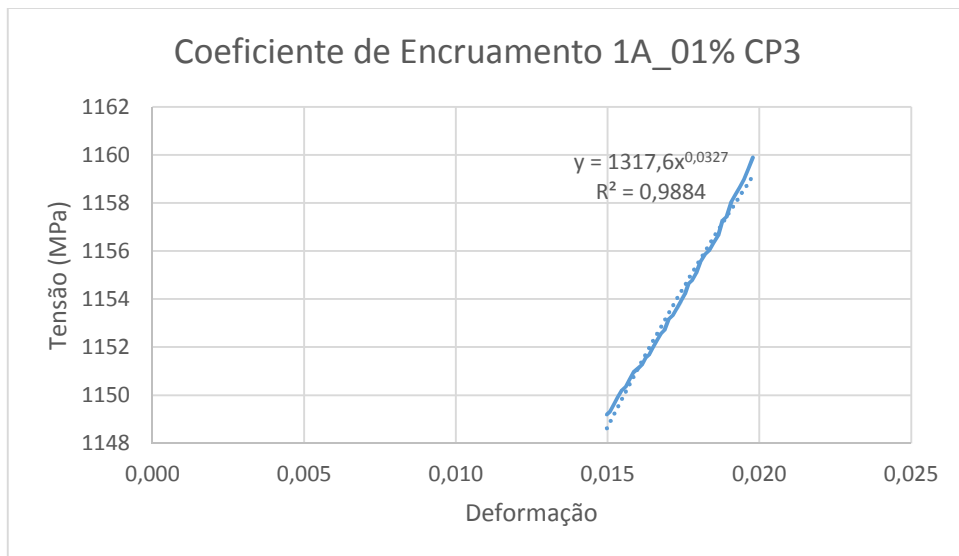
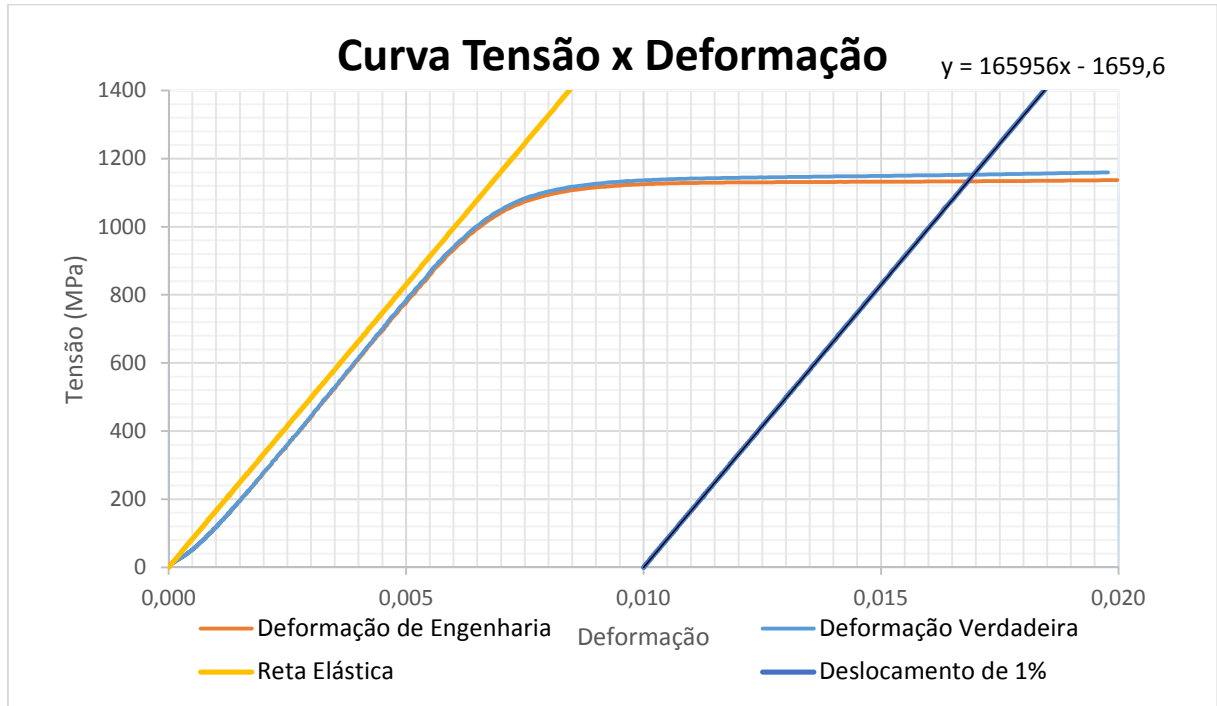
## ANEXO 2

Seguem os gráficos referente à amostra 1A\_01% CP2:



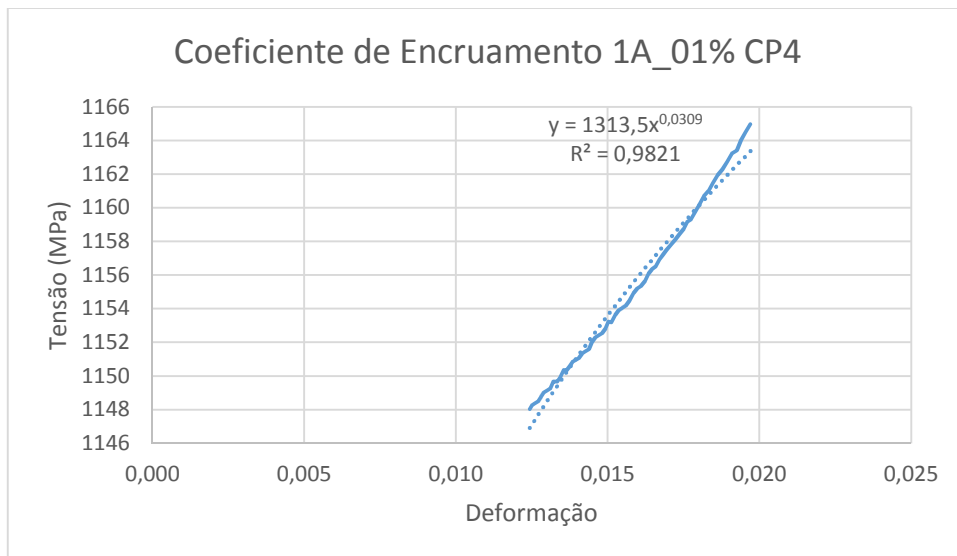
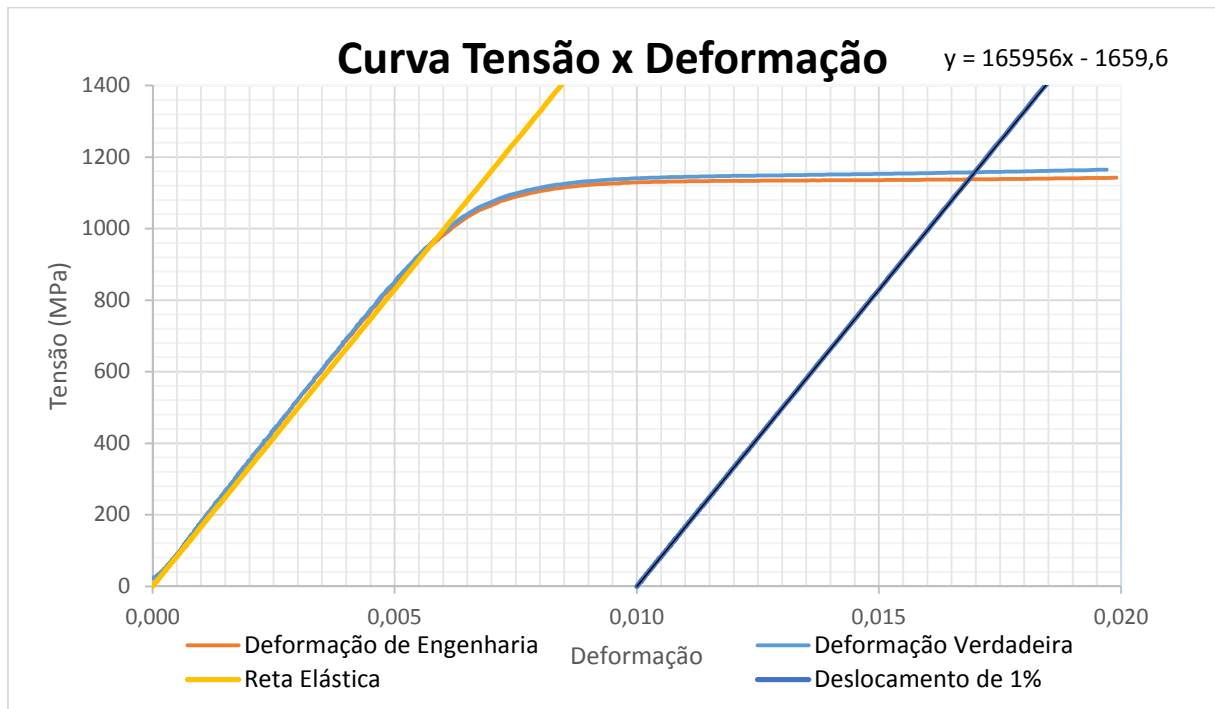
### ANEXO 3

Seguem os gráficos referente à amostra 1A\_01% CP3:



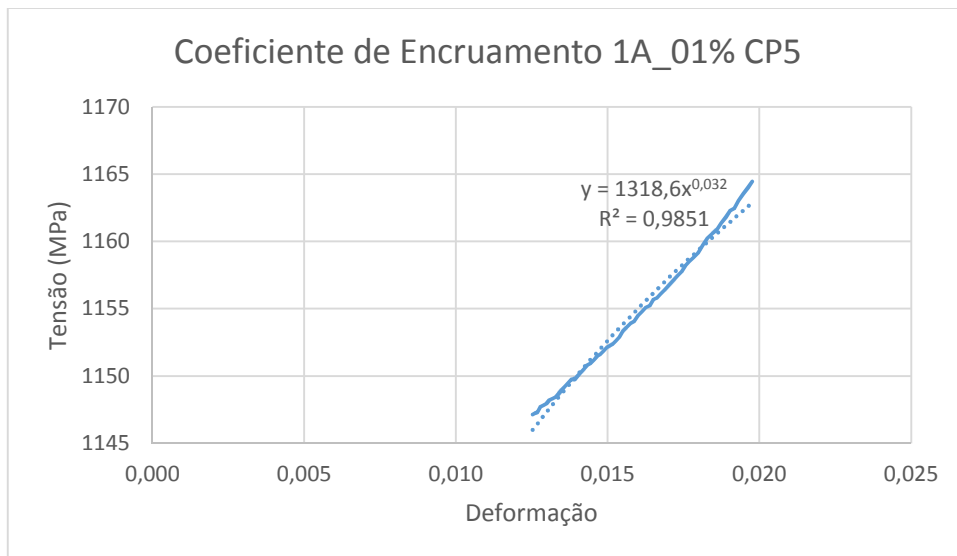
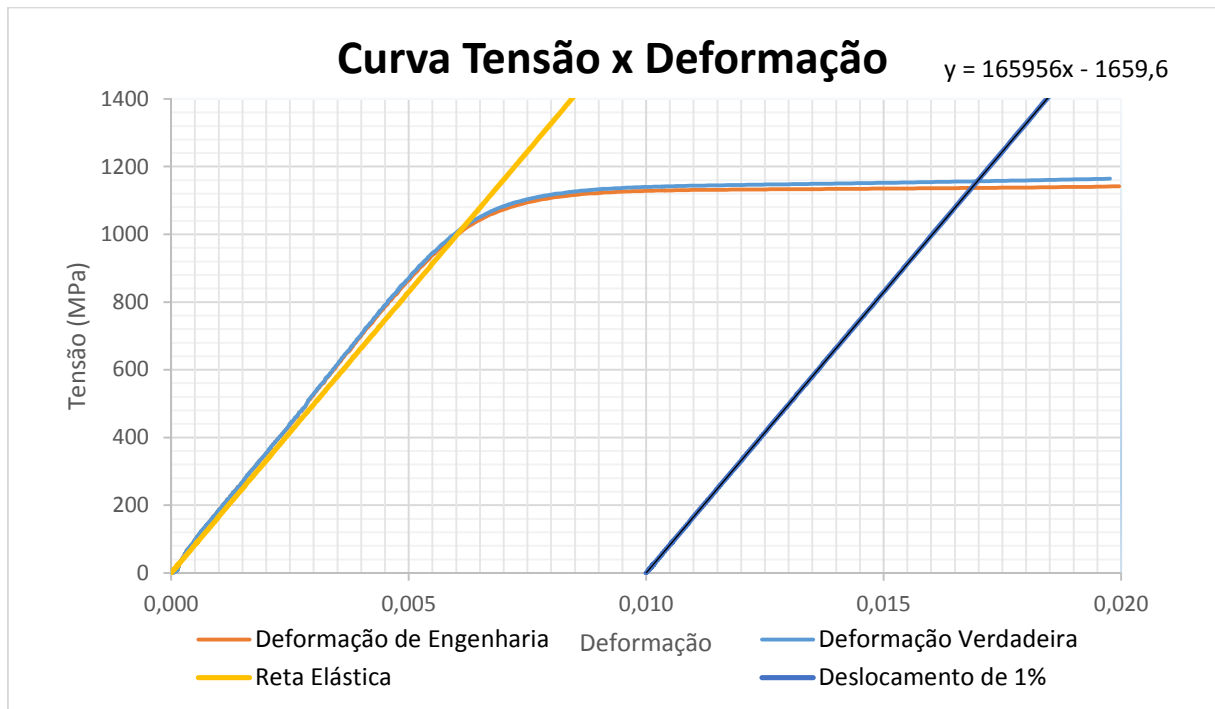
## ANEXO 4

Seguem os gráficos referente à amostra 1A\_01% CP4:



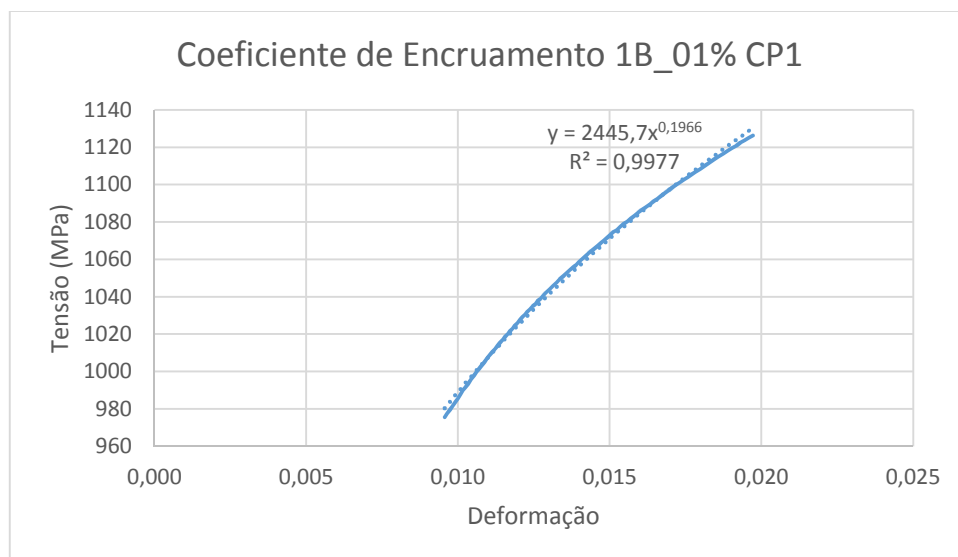
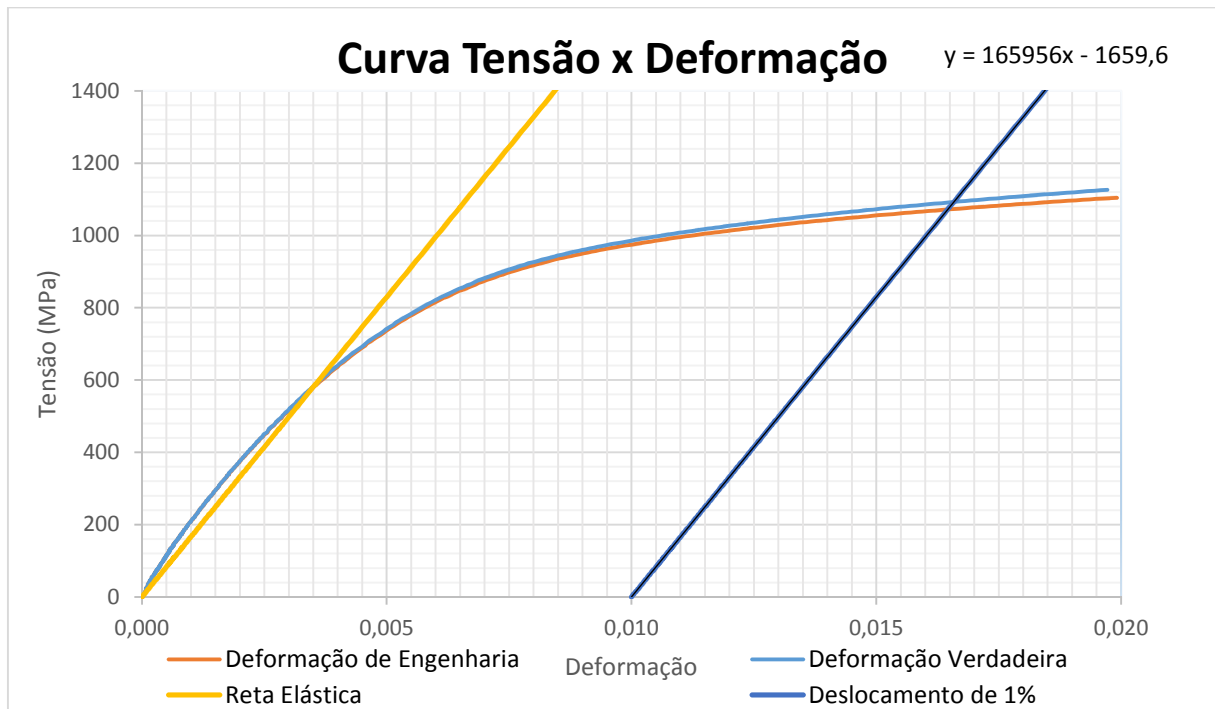
## ANEXO 5

Seguem os gráficos referente à amostra 1A\_01% CP5:



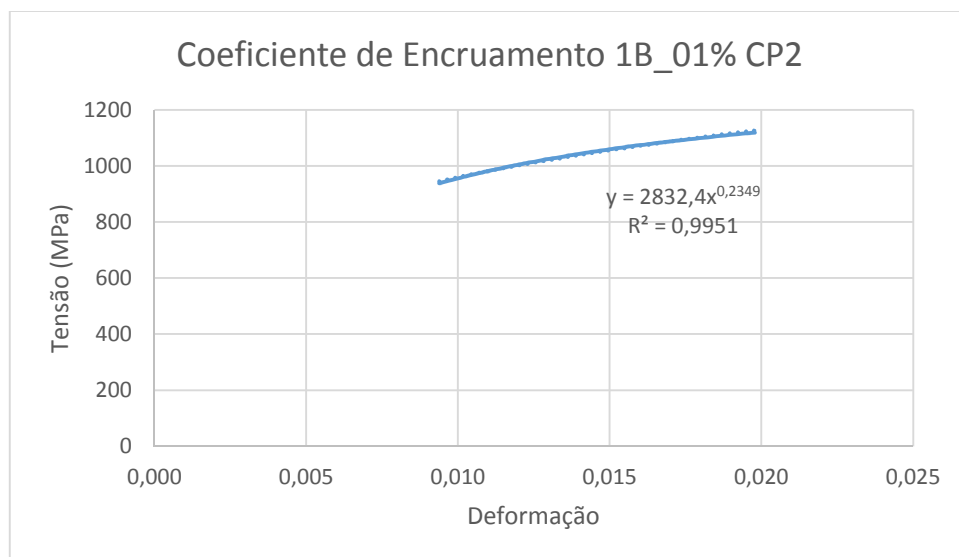
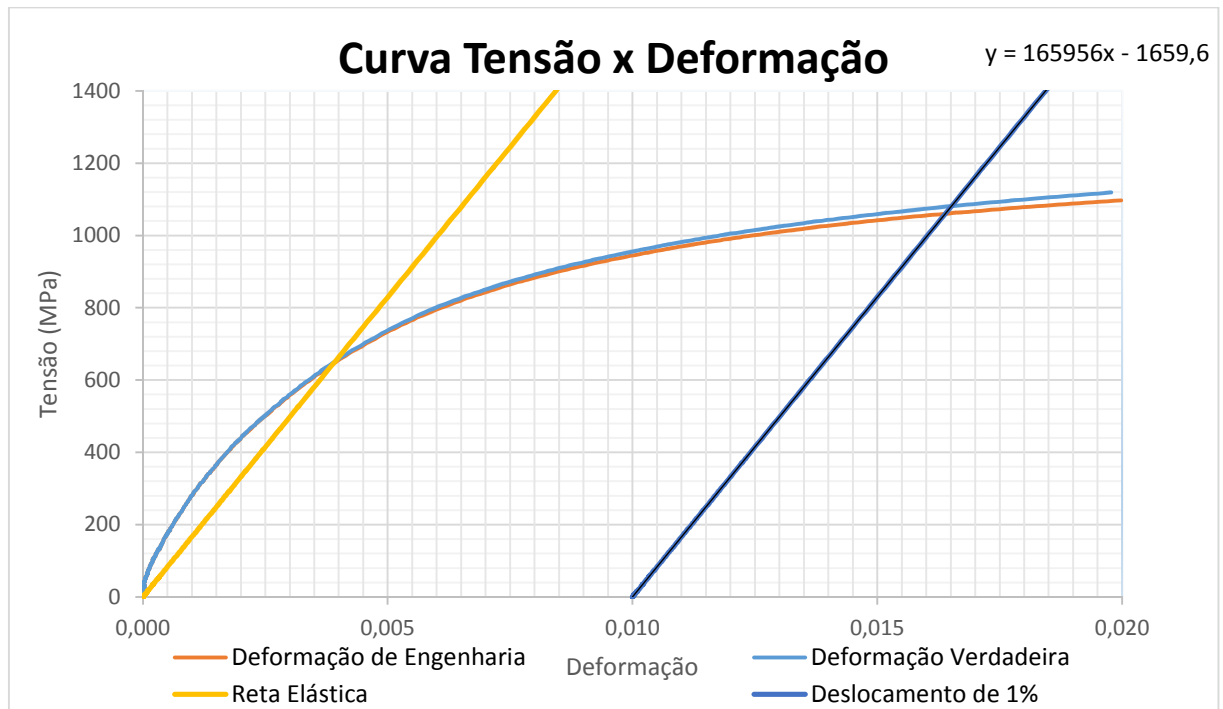
## ANEXO 6

Seguem os gráficos referente à amostra 1B\_01% CP1:



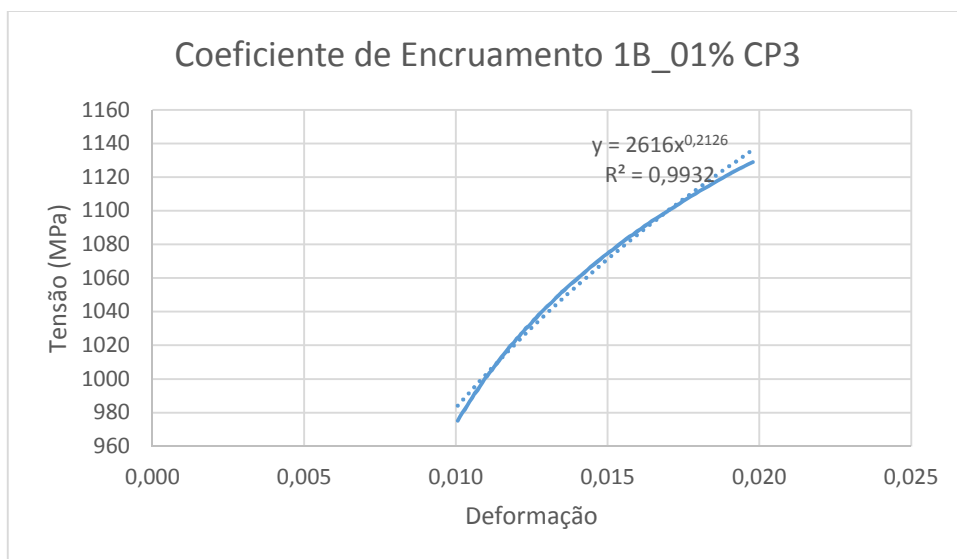
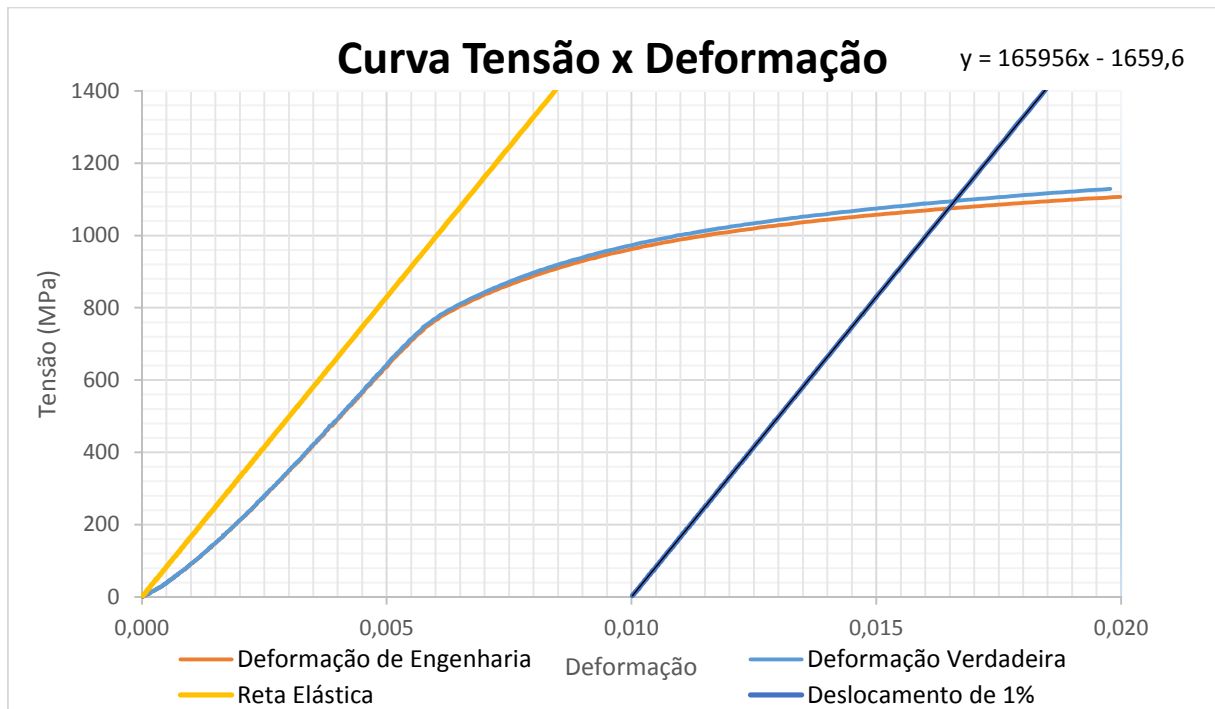
## ANEXO 7

Seguem os gráficos referente à amostra 1B\_01% CP2:



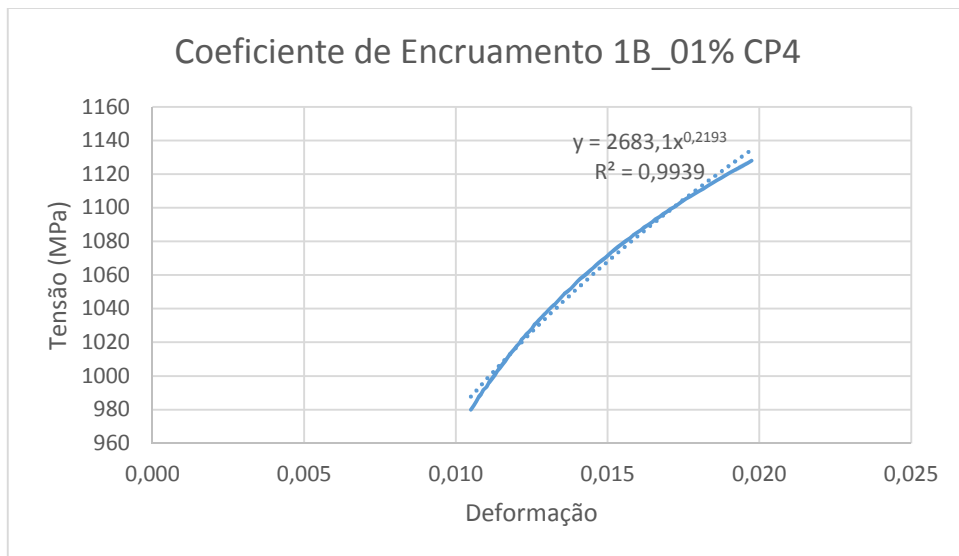
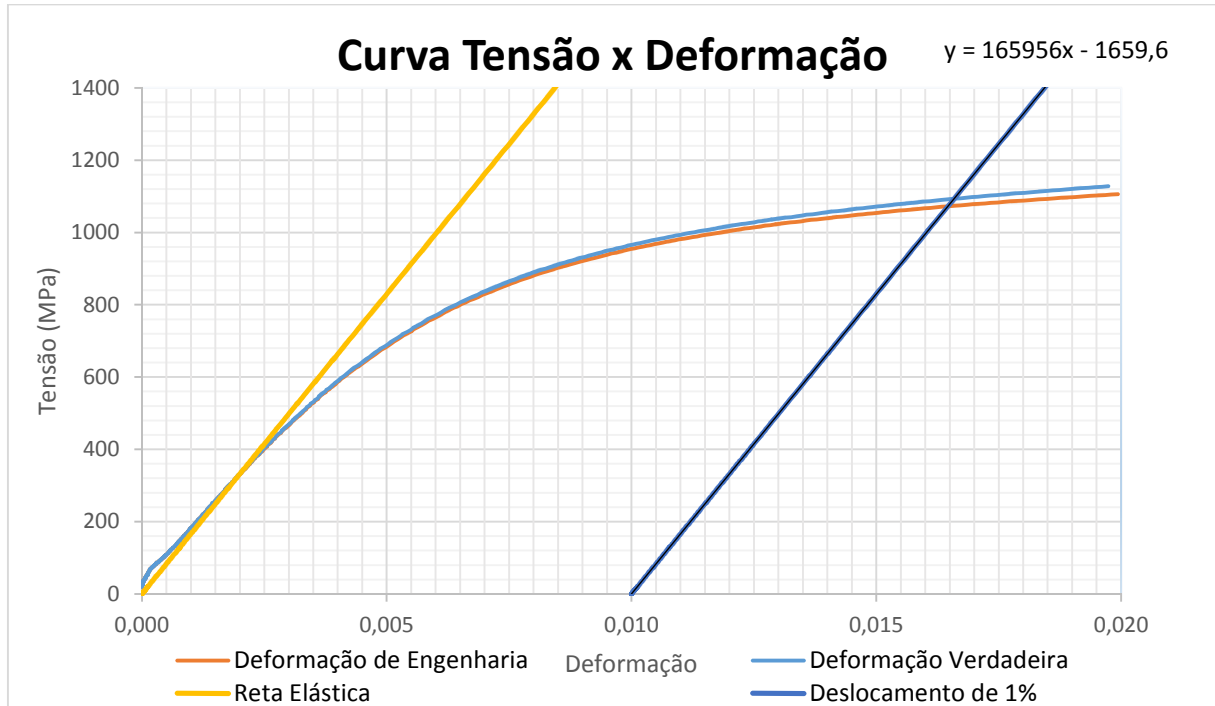
## ANEXO 8

Seguem os gráficos referente à amostra 1B\_01% CP3:



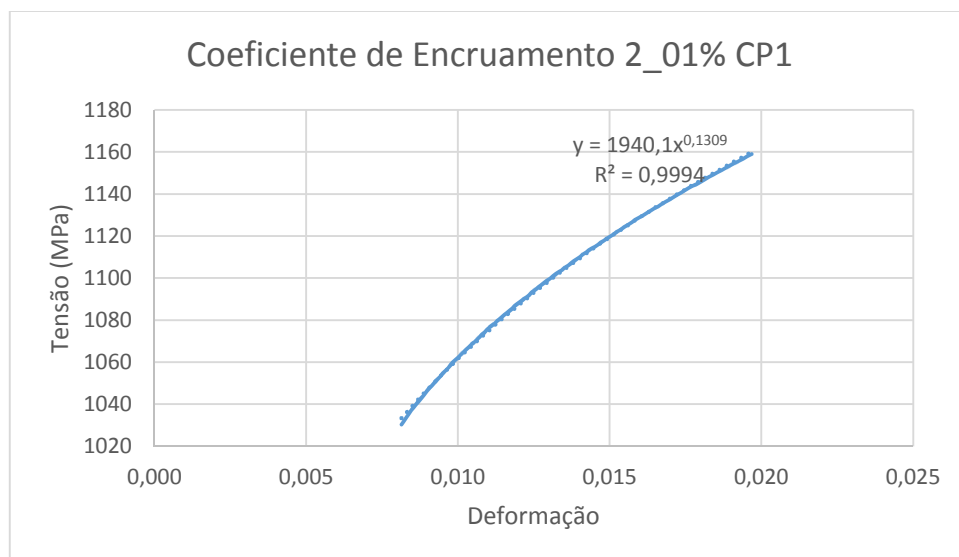
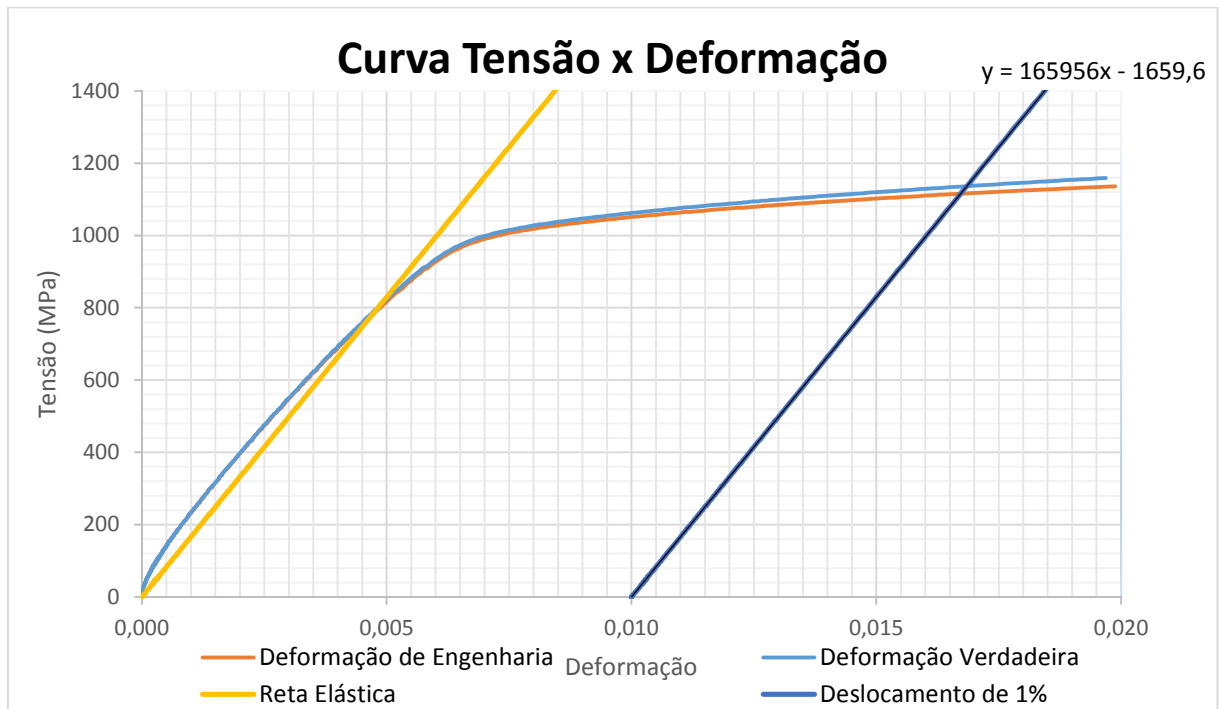
## ANEXO 9

Seguem os gráficos referente à amostra 1B\_01% CP4:



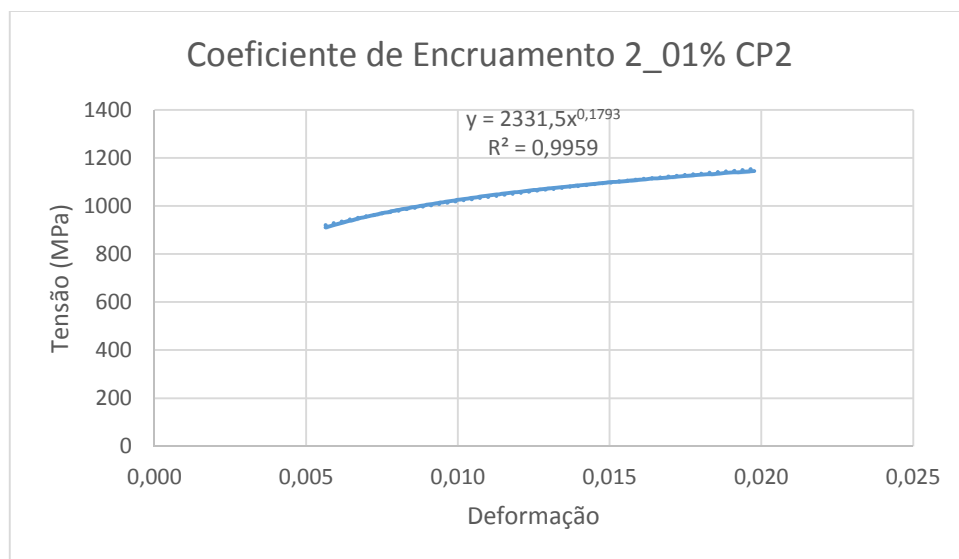
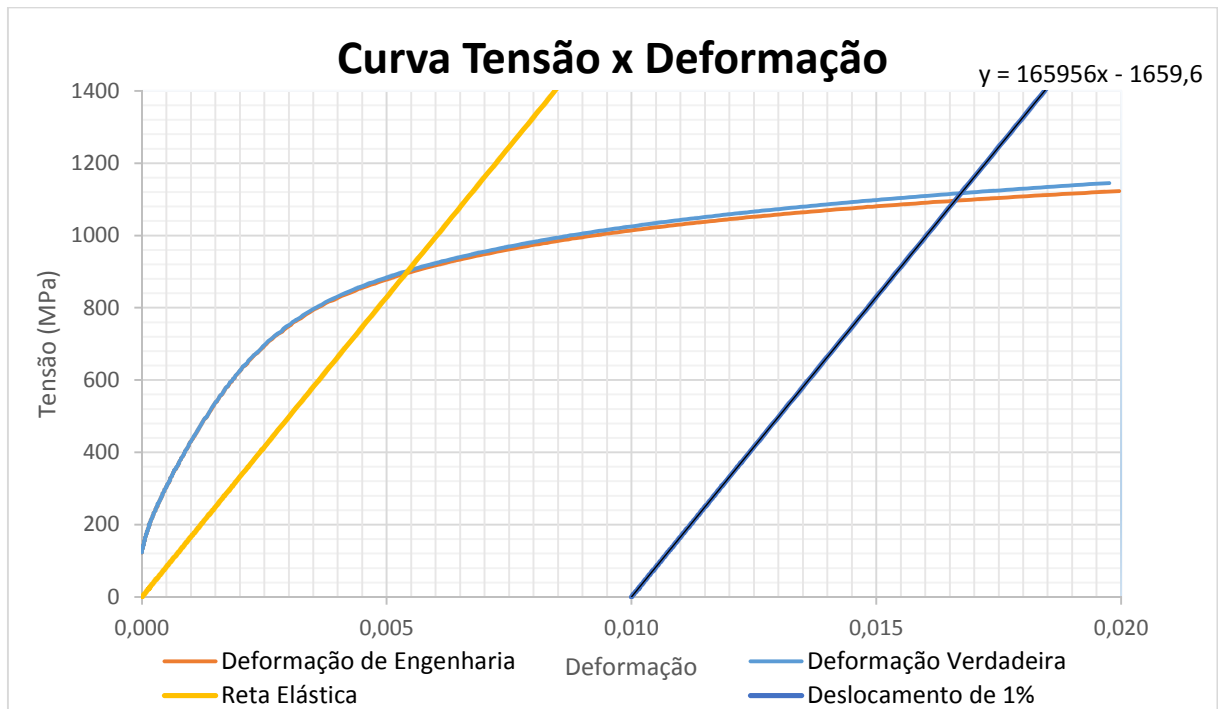
## ANEXO 10

Seguem os gráficos referente à amostra 2\_01% CP1:



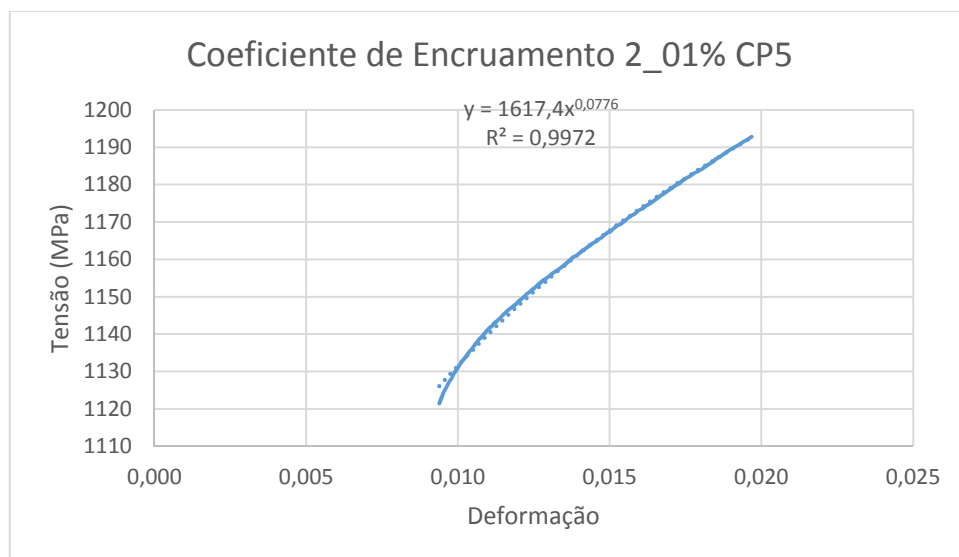
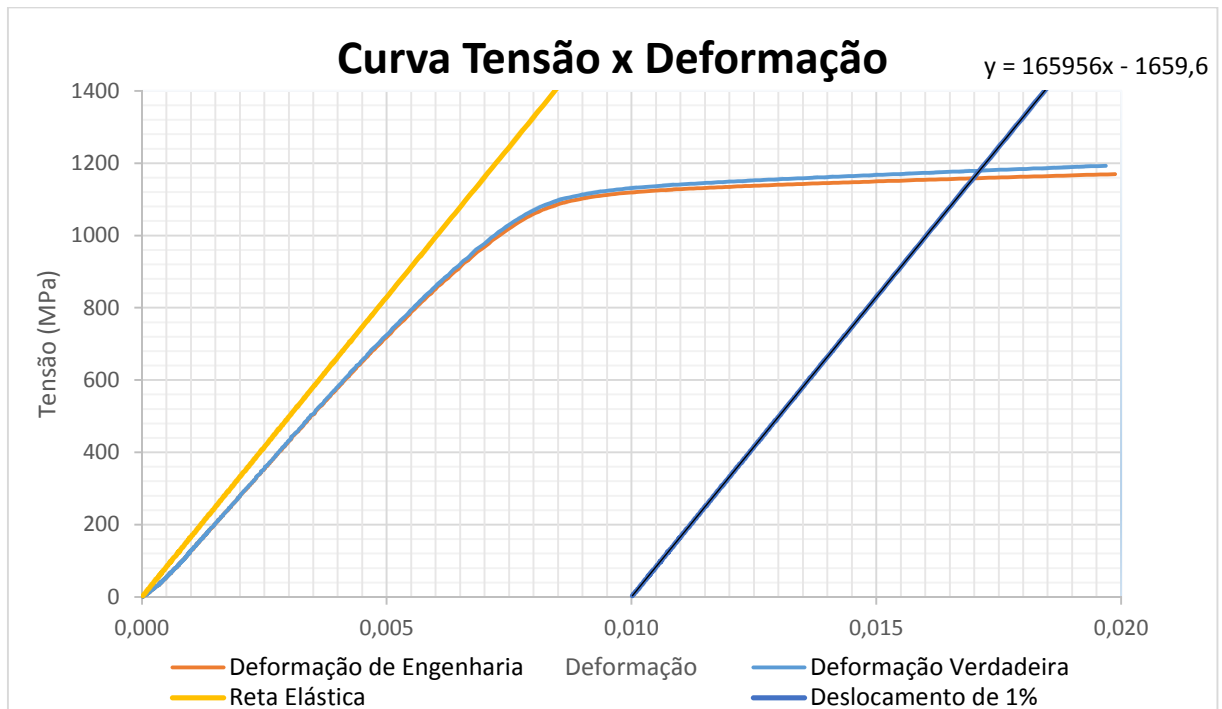
## ANEXO 11

Seguem os gráficos referente à amostra 2\_01% CP2:



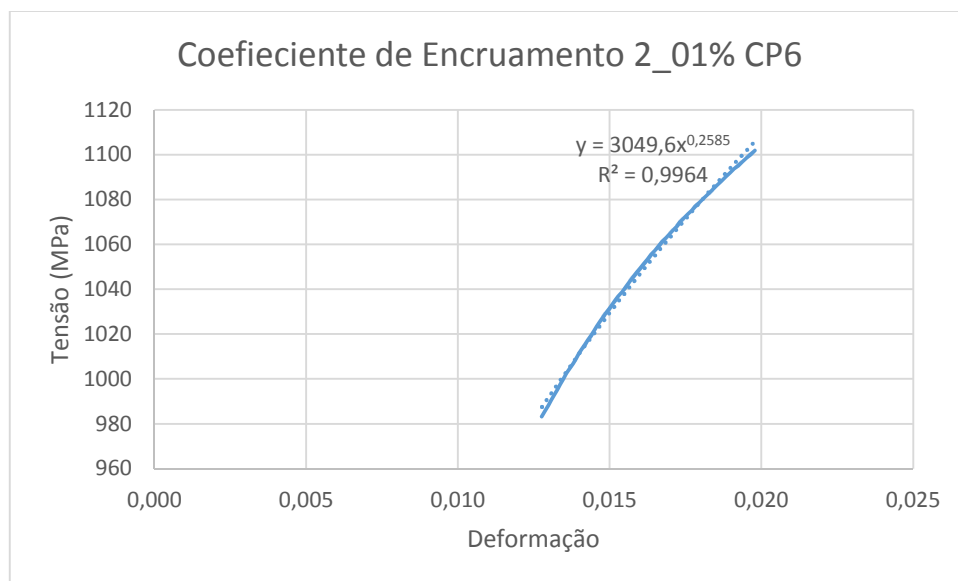
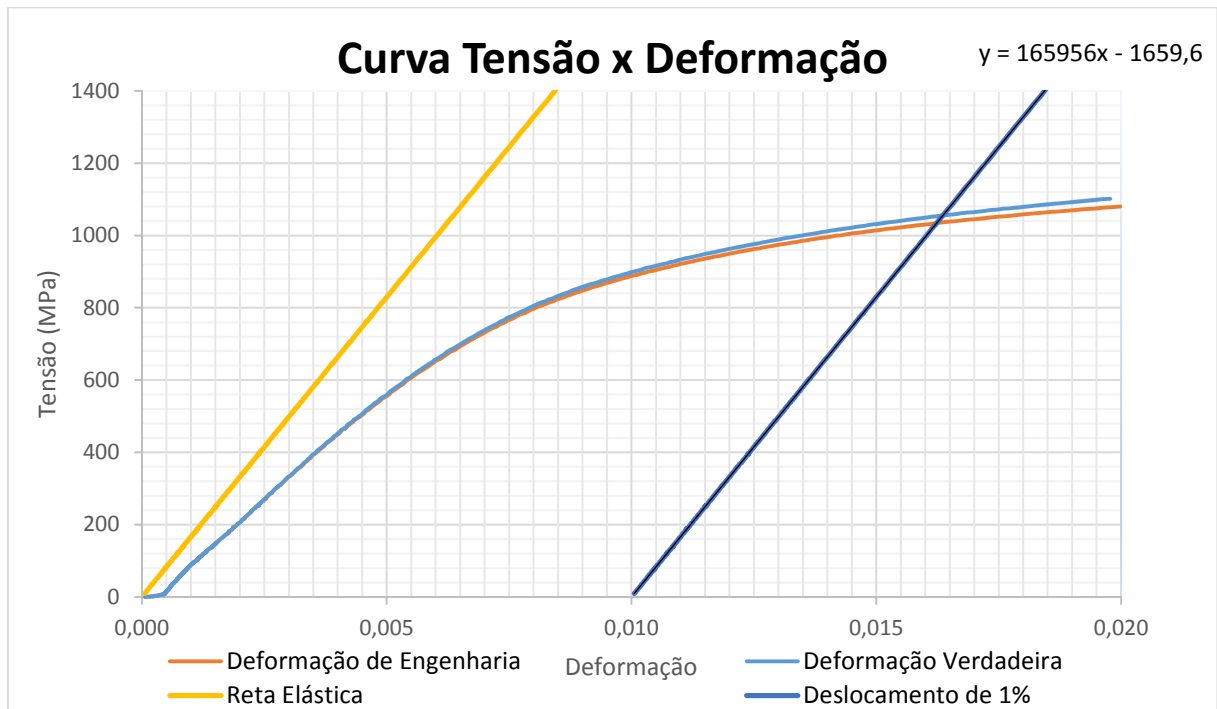
## ANEXO 12

Seguem os gráficos referente à amostra 2\_01% CP5:



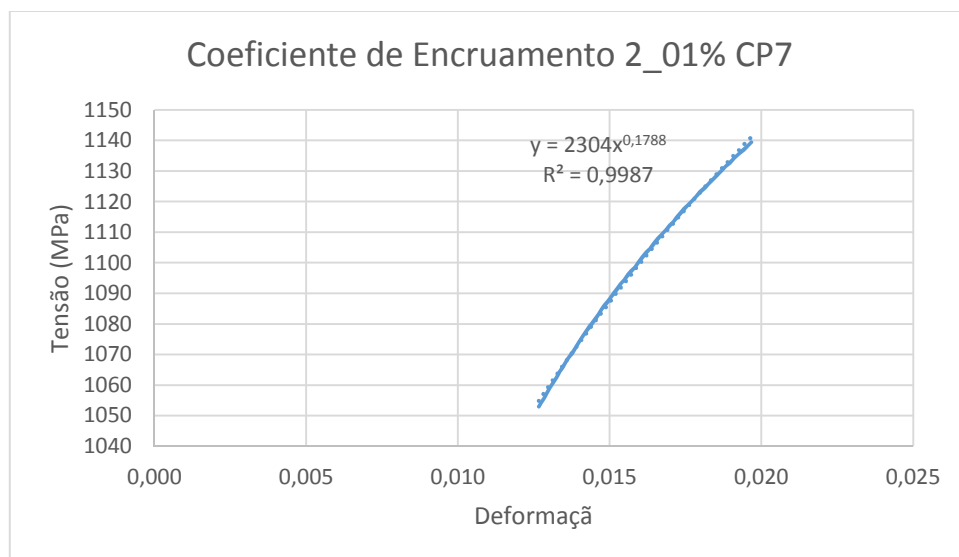
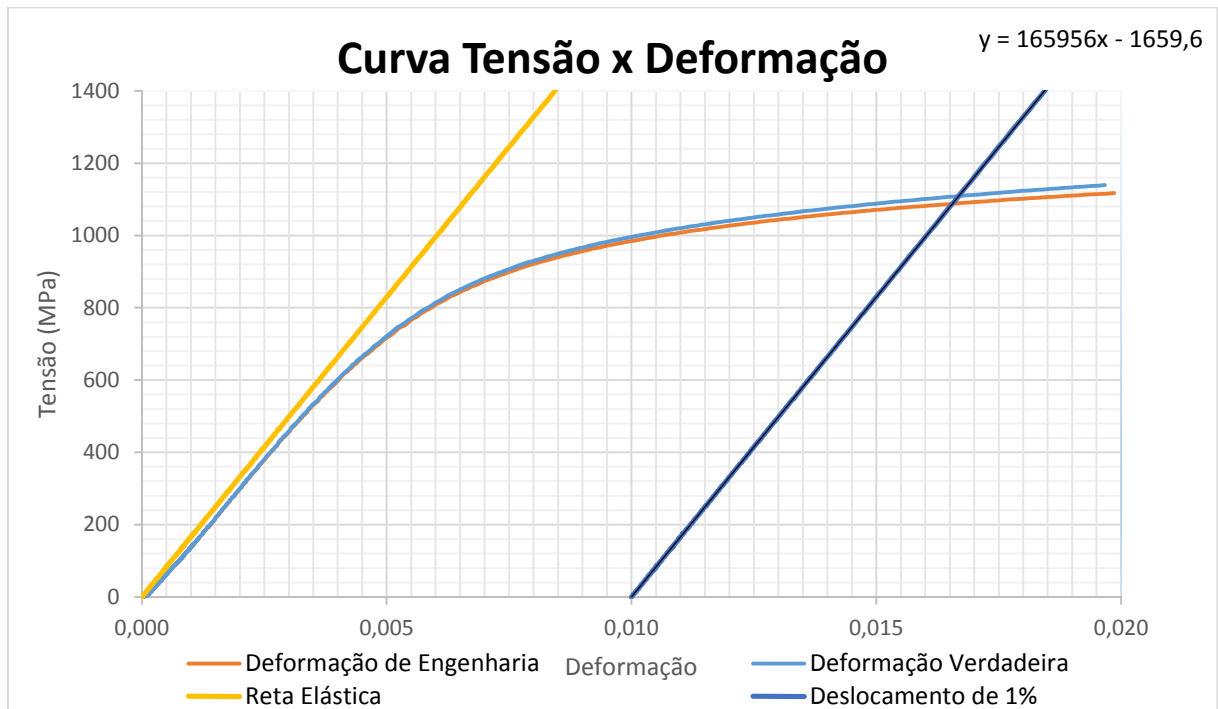
### ANEXO 13

Seguem os gráficos referente à amostra 2\_01% CP6:



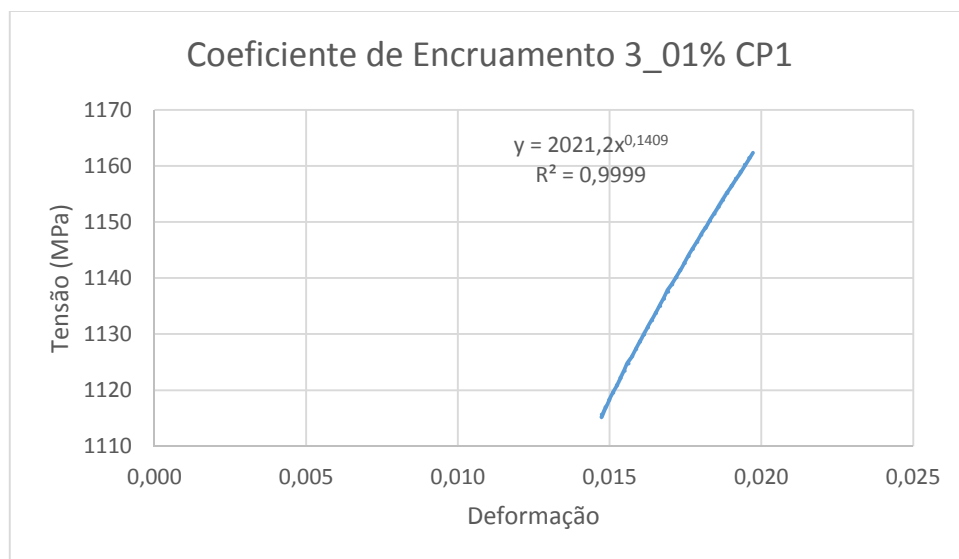
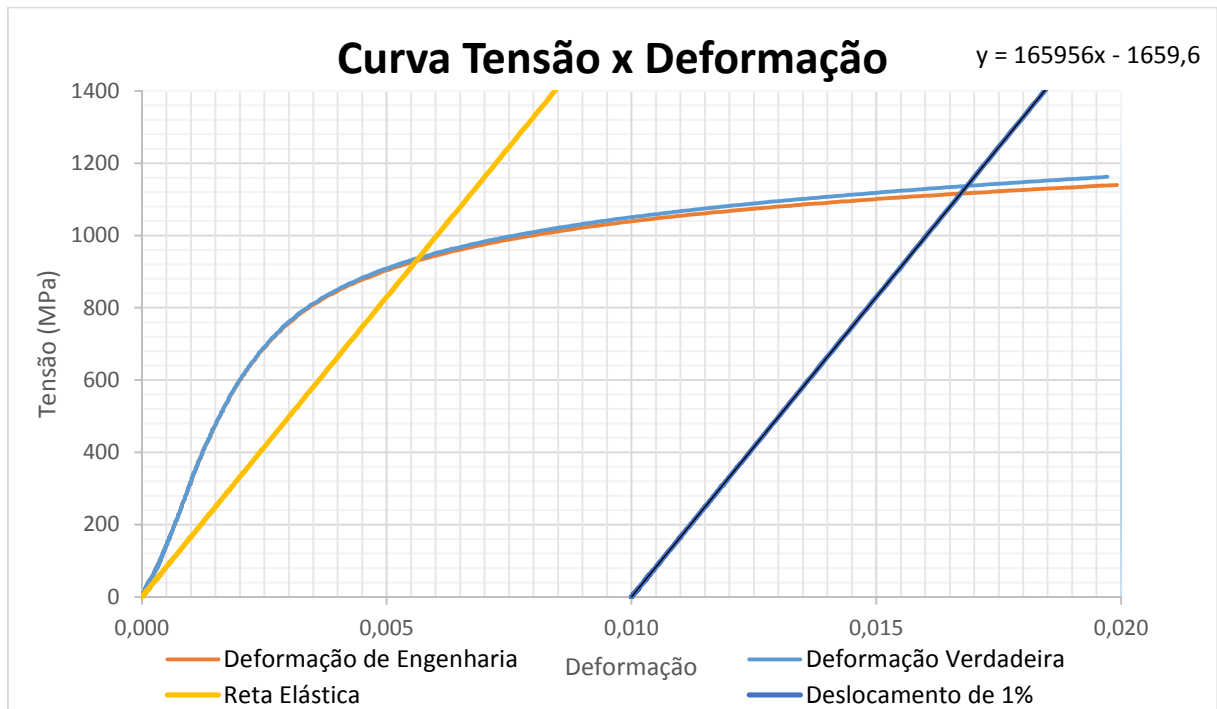
## ANEXO 14

Seguem os gráficos referente à amostra 2\_01% CP7:



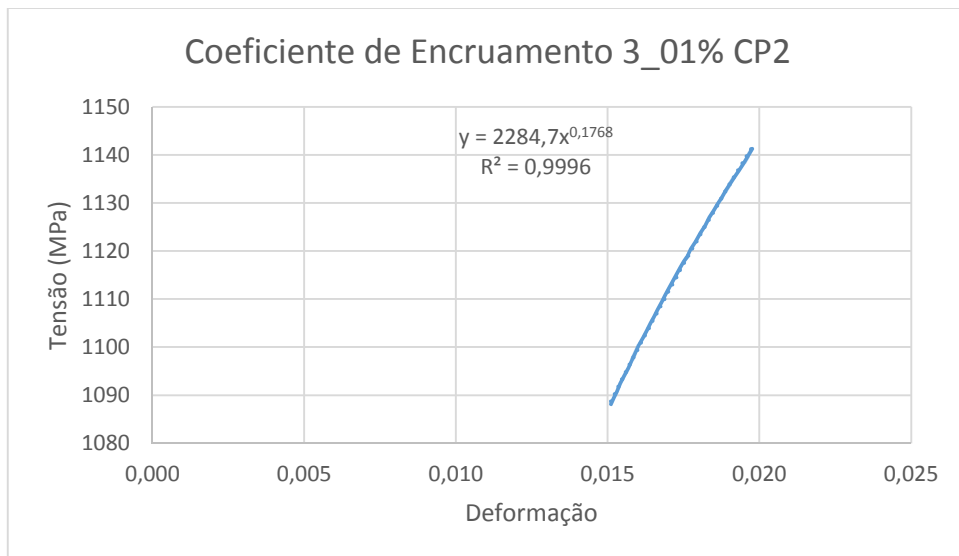
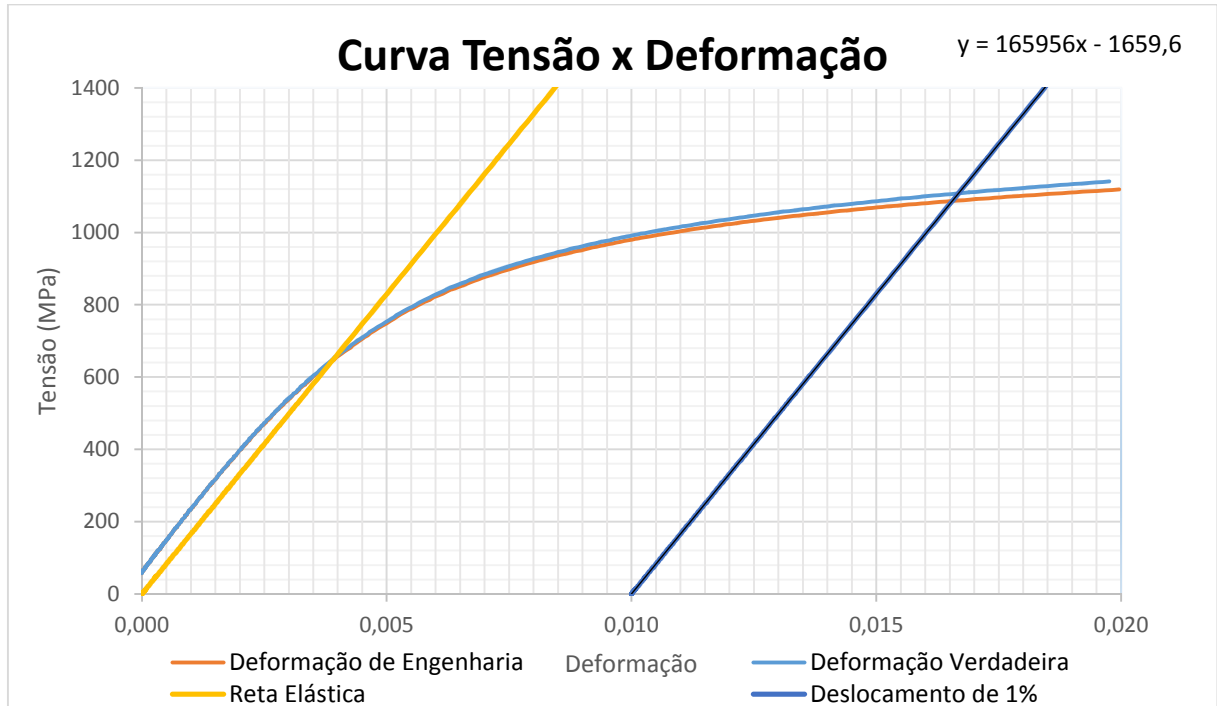
## ANEXO 15

Seguem os gráficos referente à amostra 3\_01% CP1:



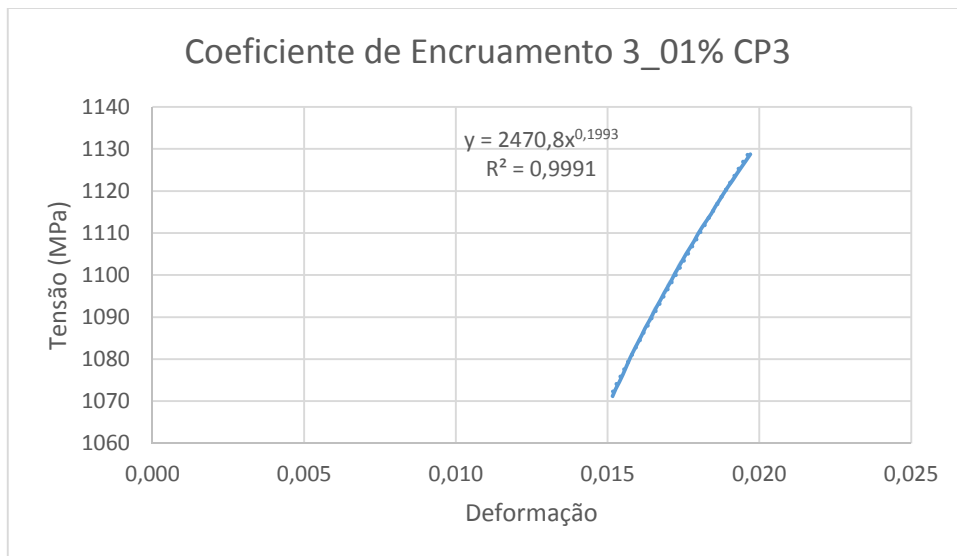
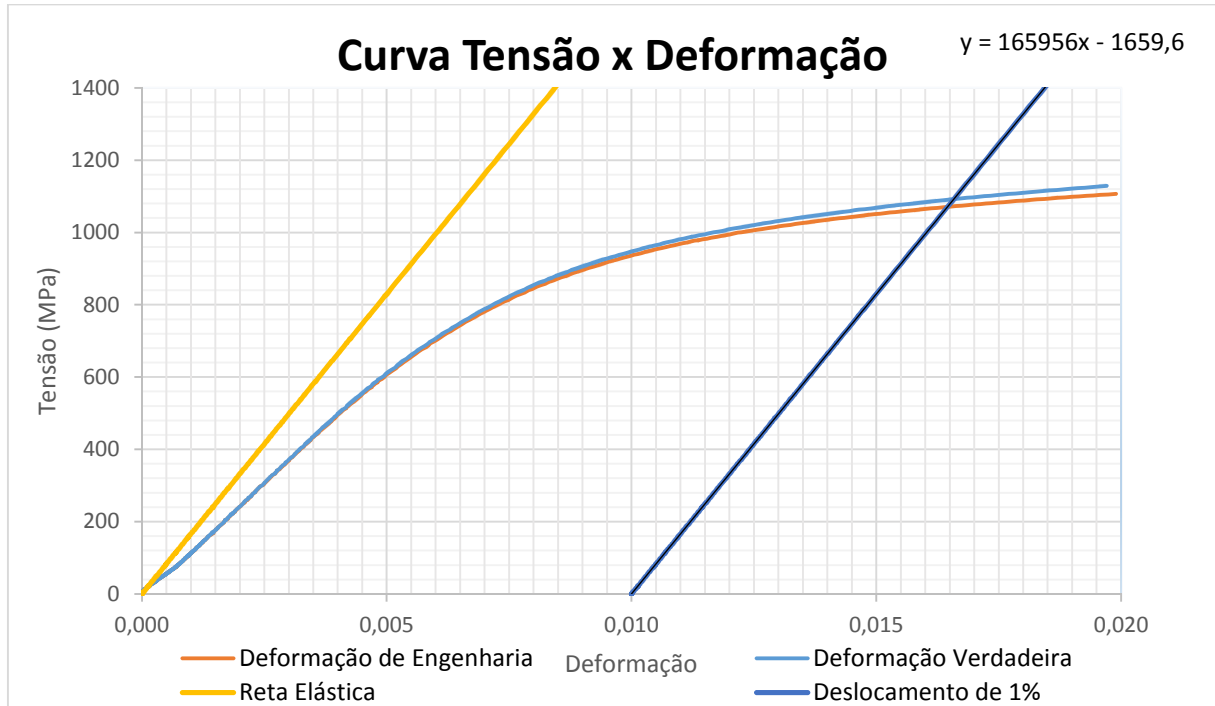
## ANEXO 16

Seguem os gráficos referente à amostra 3\_01% CP2:



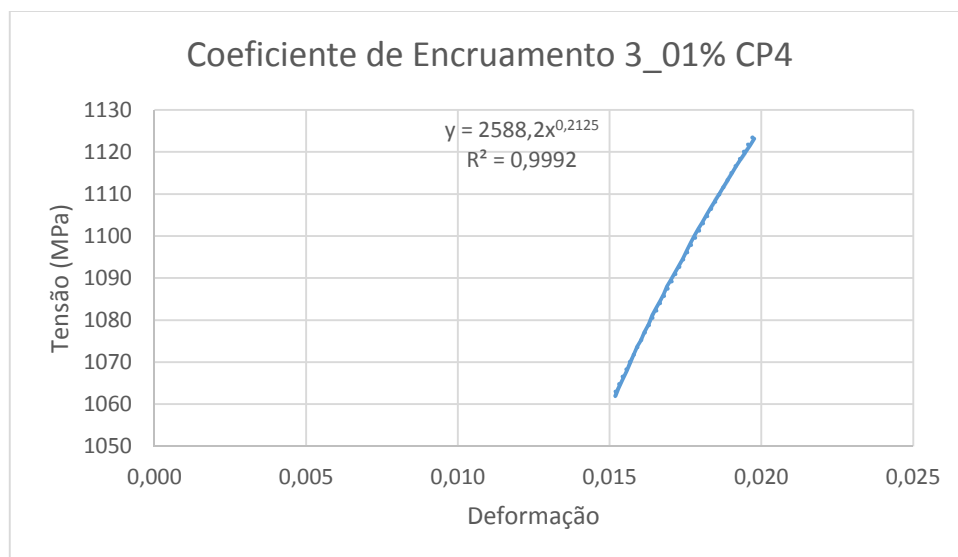
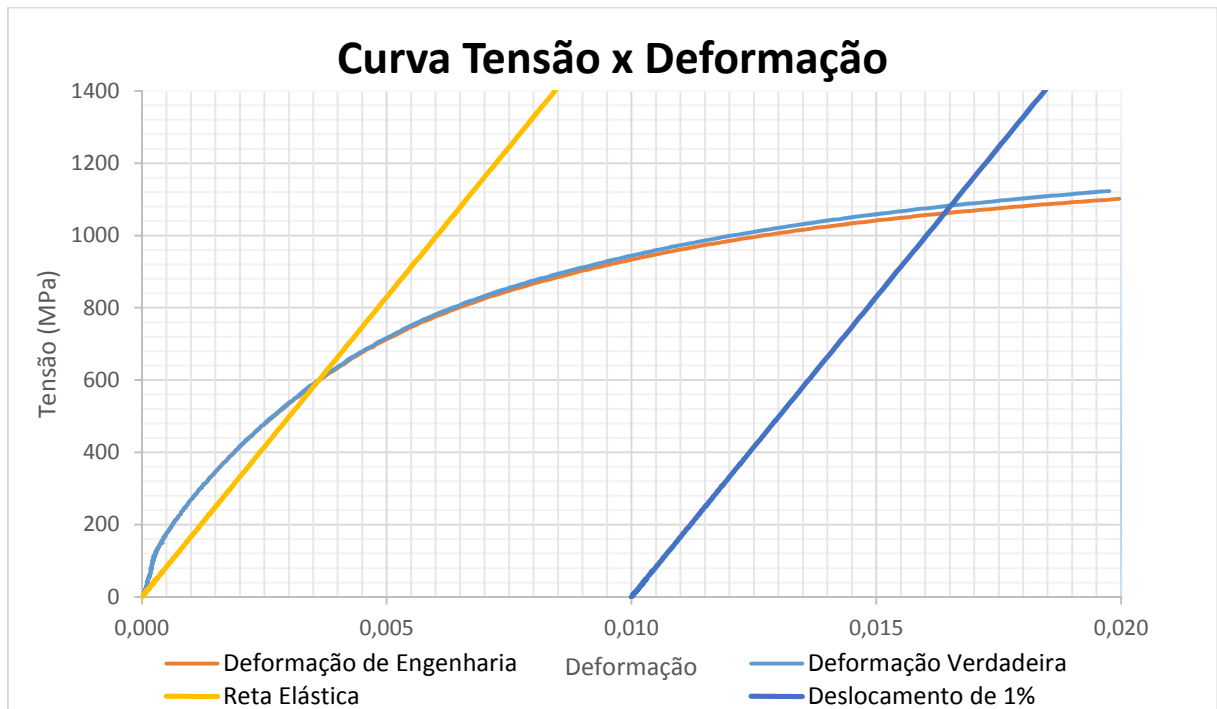
## ANEXO 17

Seguem os gráficos referente à amostra 3\_01% CP3:



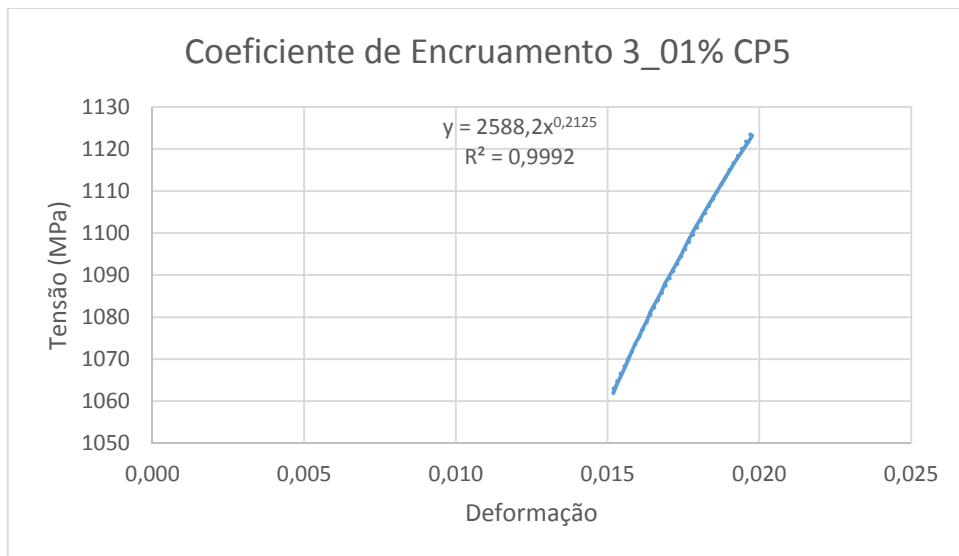
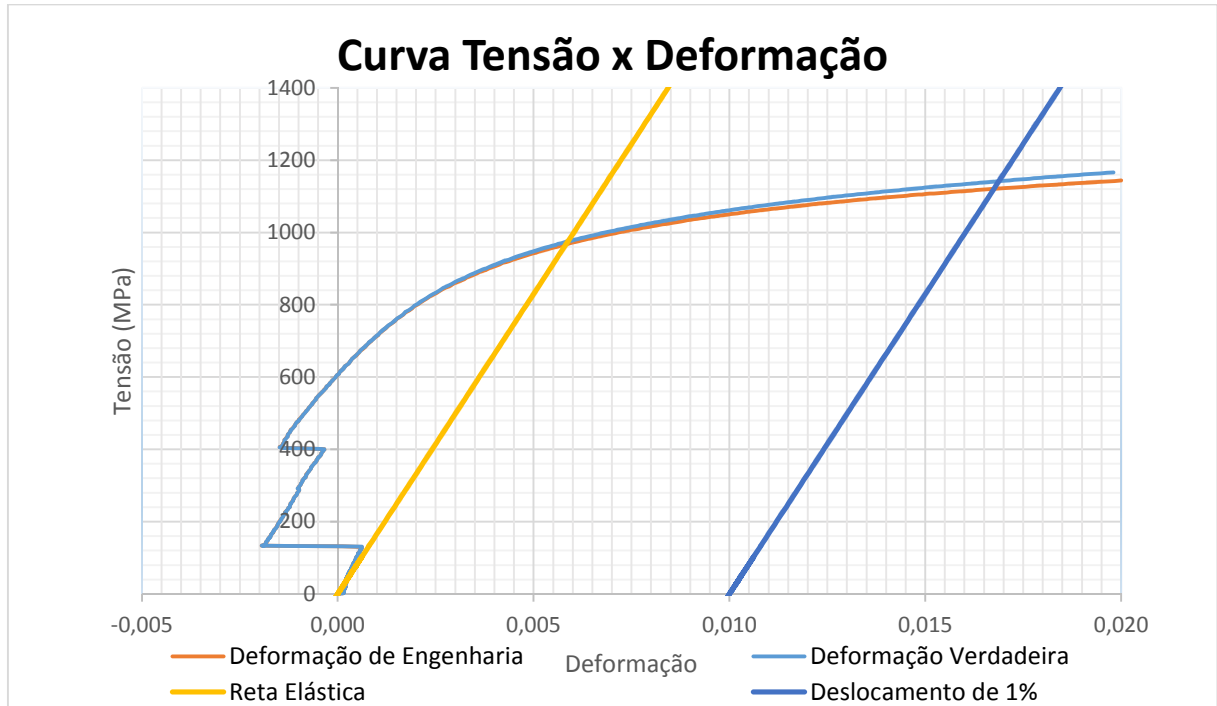
## ANEXO 18

Seguem os gráficos referente à amostra 3\_01% CP4:



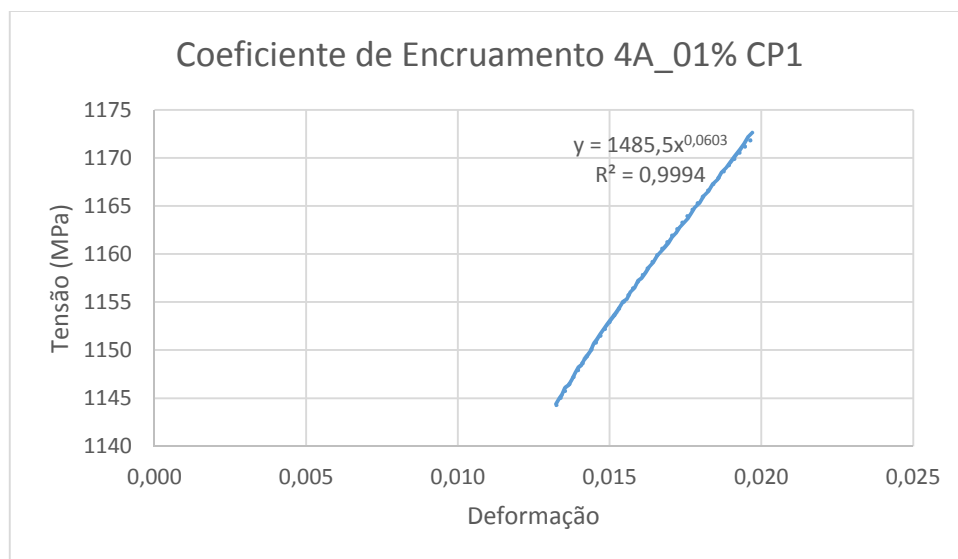
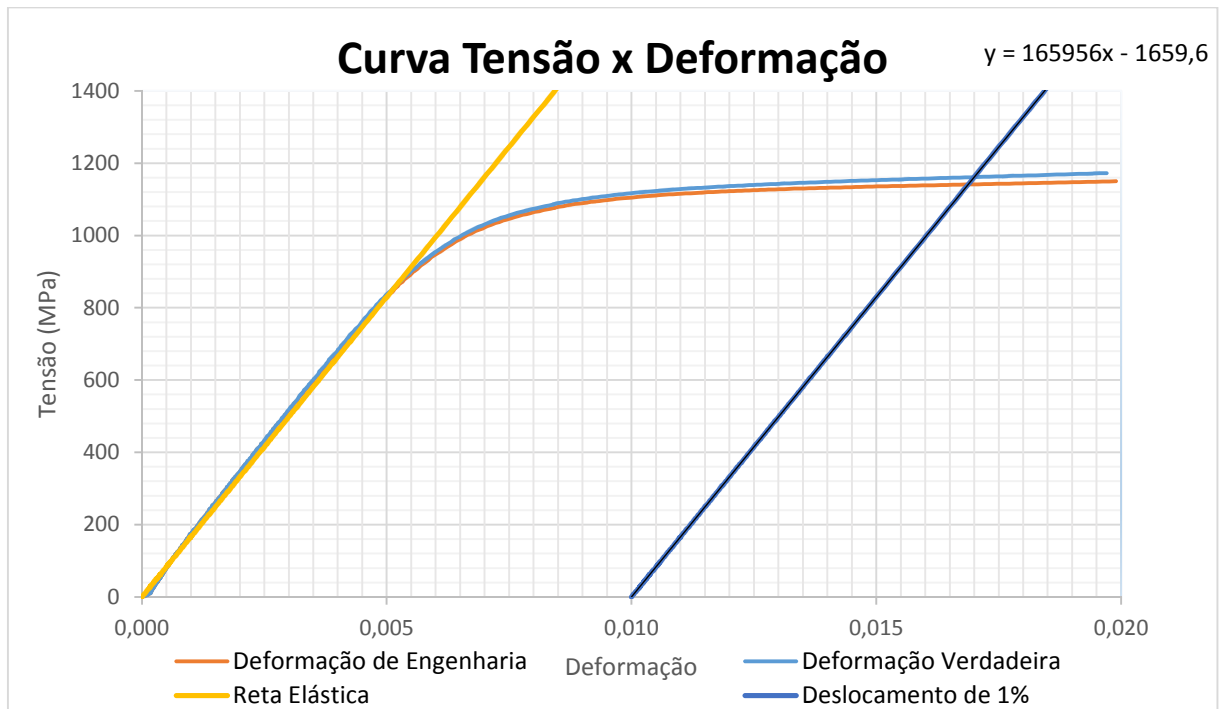
## ANEXO 19

Seguem os gráficos referente à amostra 3\_01% CP5:



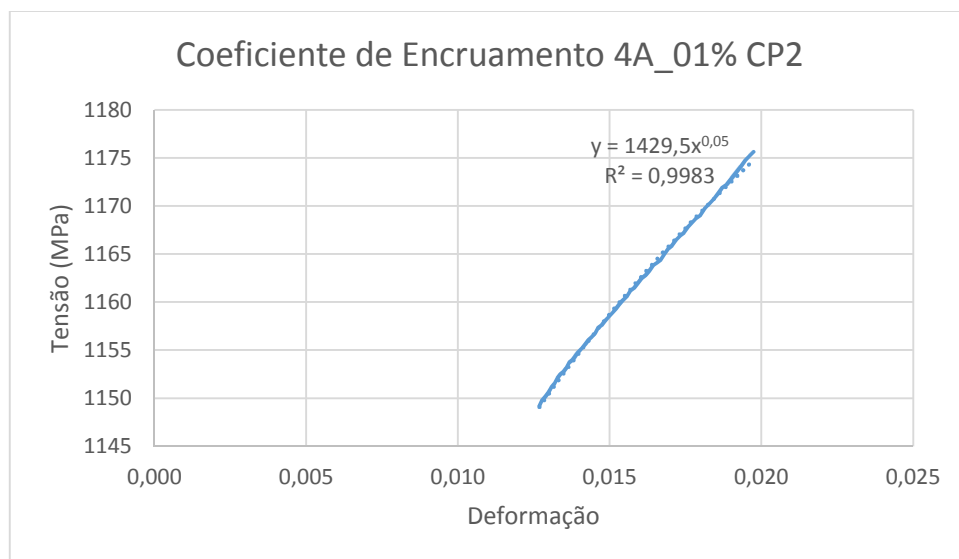
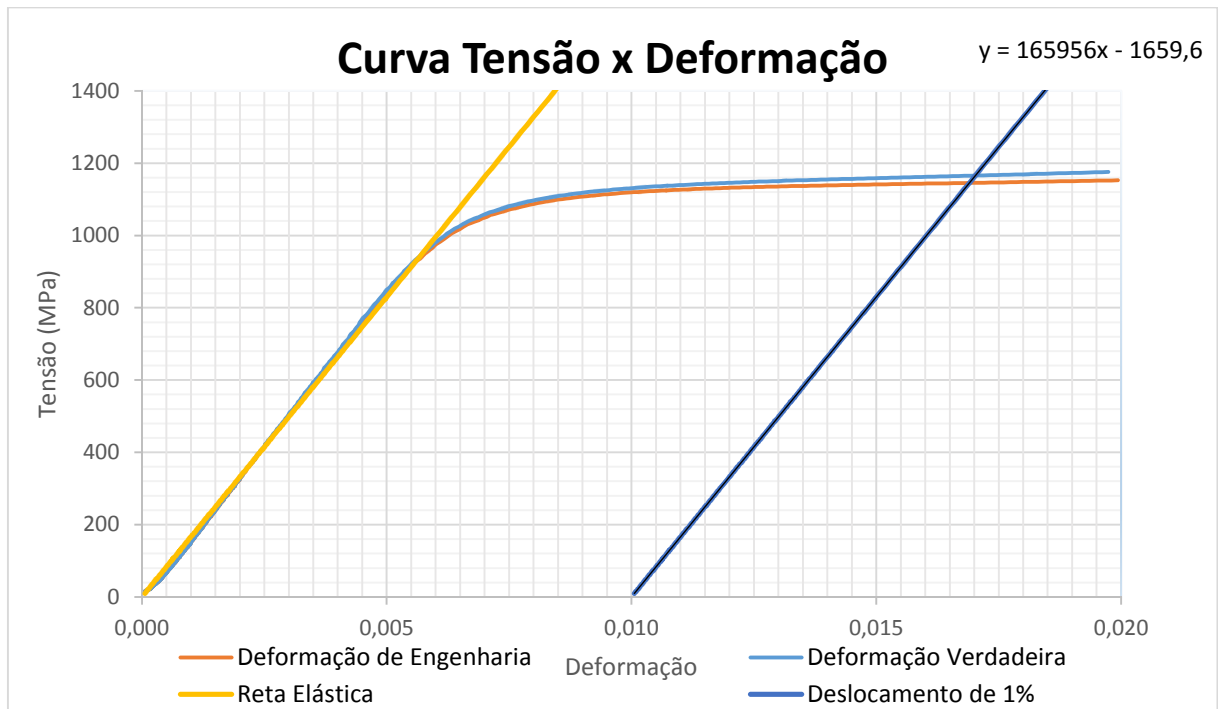
## ANEXO 20

Seguem os gráficos referente à amostra 4A\_01% CP1:



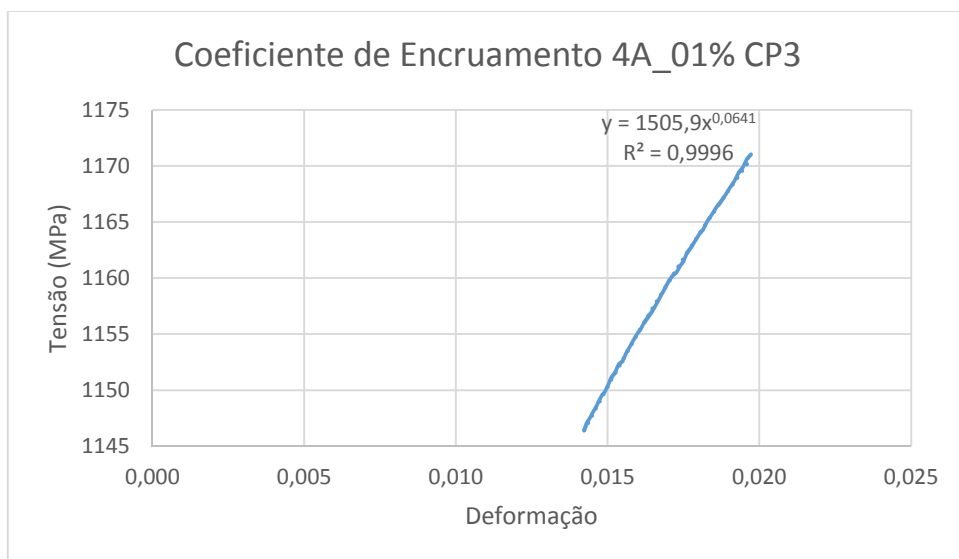
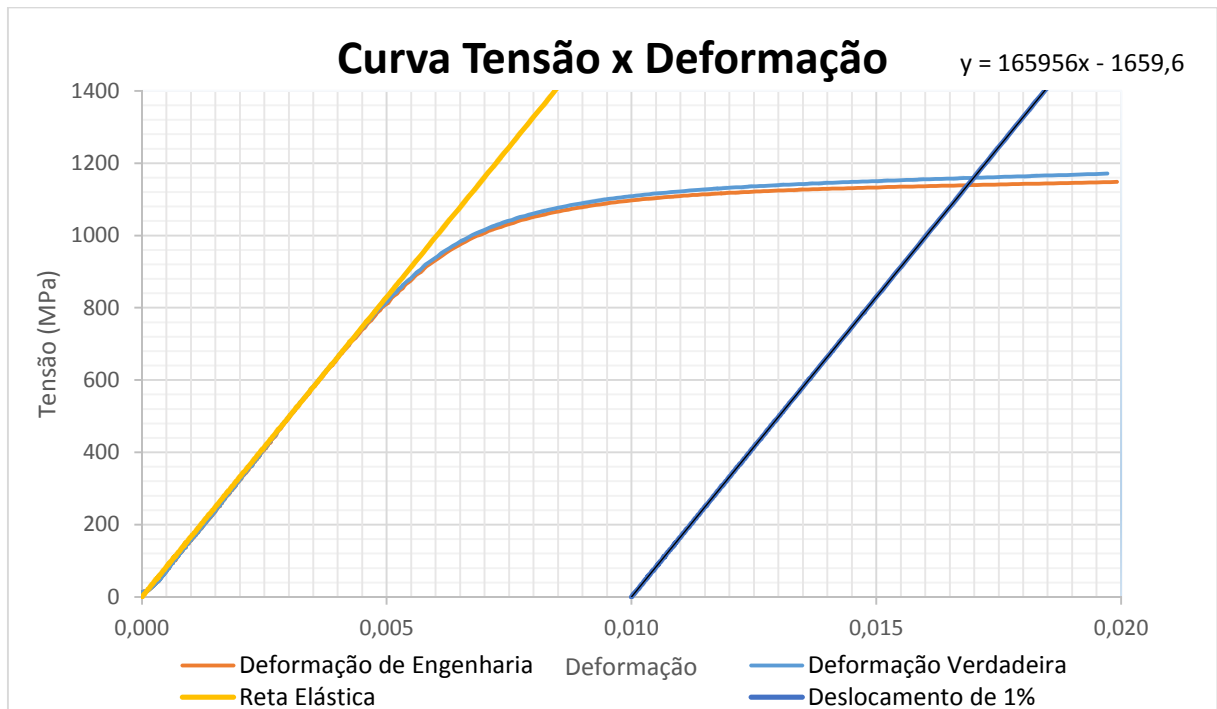
## ANEXO 21

Seguem os gráficos referente à amostra 4A\_01% CP2:



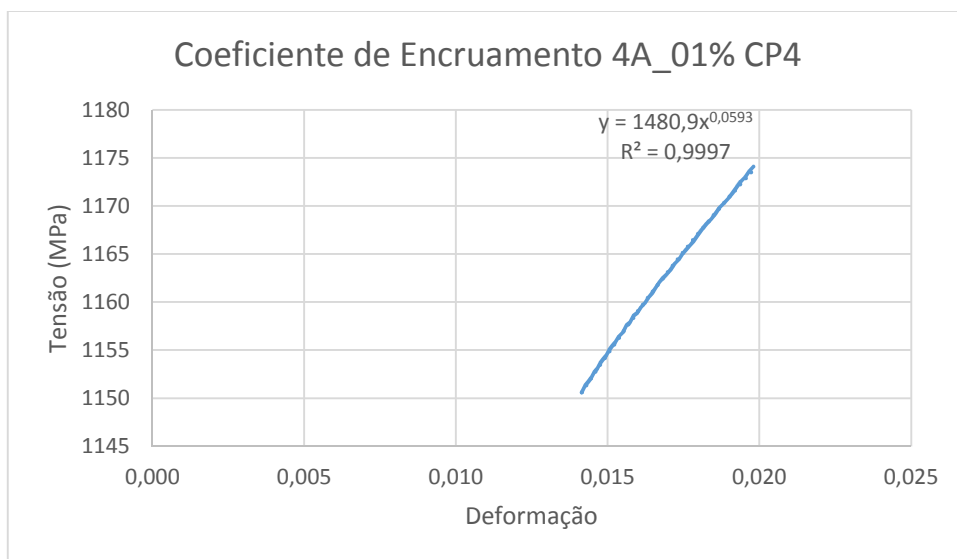
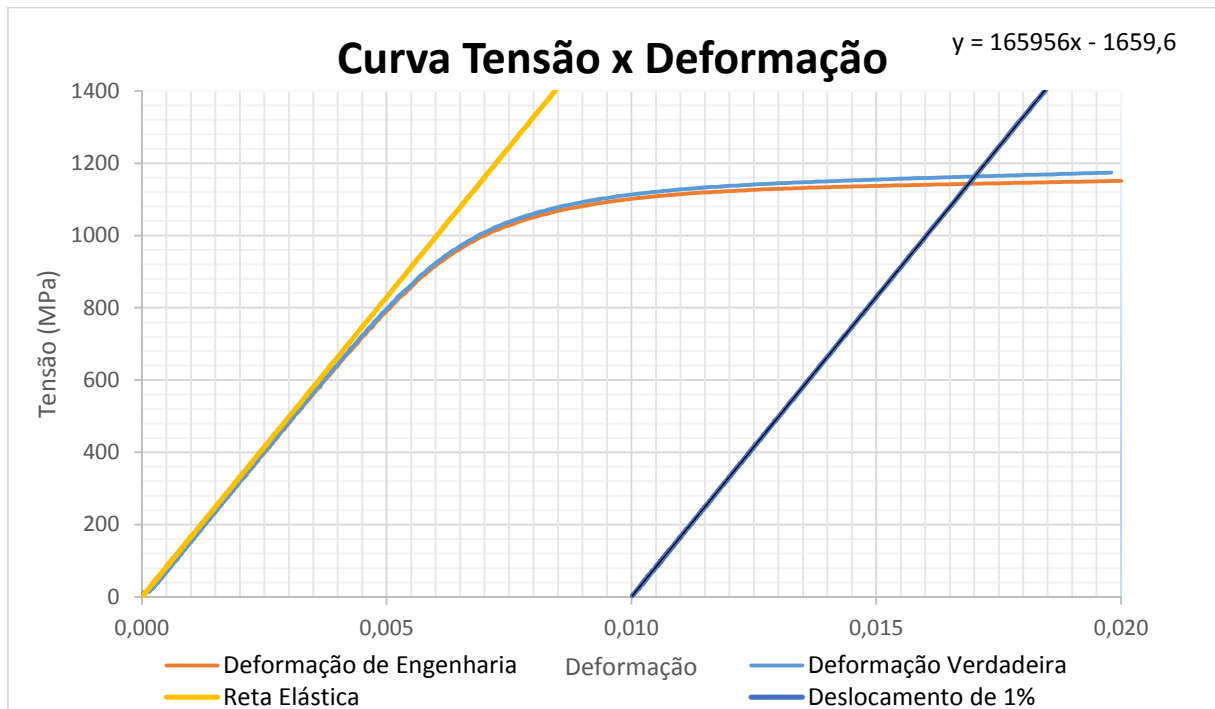
## ANEXO 22

Seguem os gráficos referente à amostra 4A\_01% CP3:



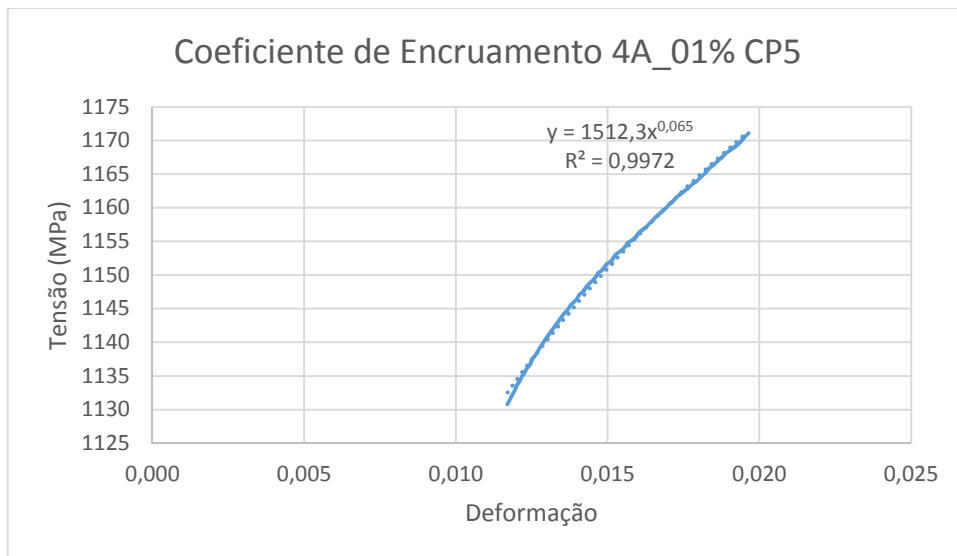
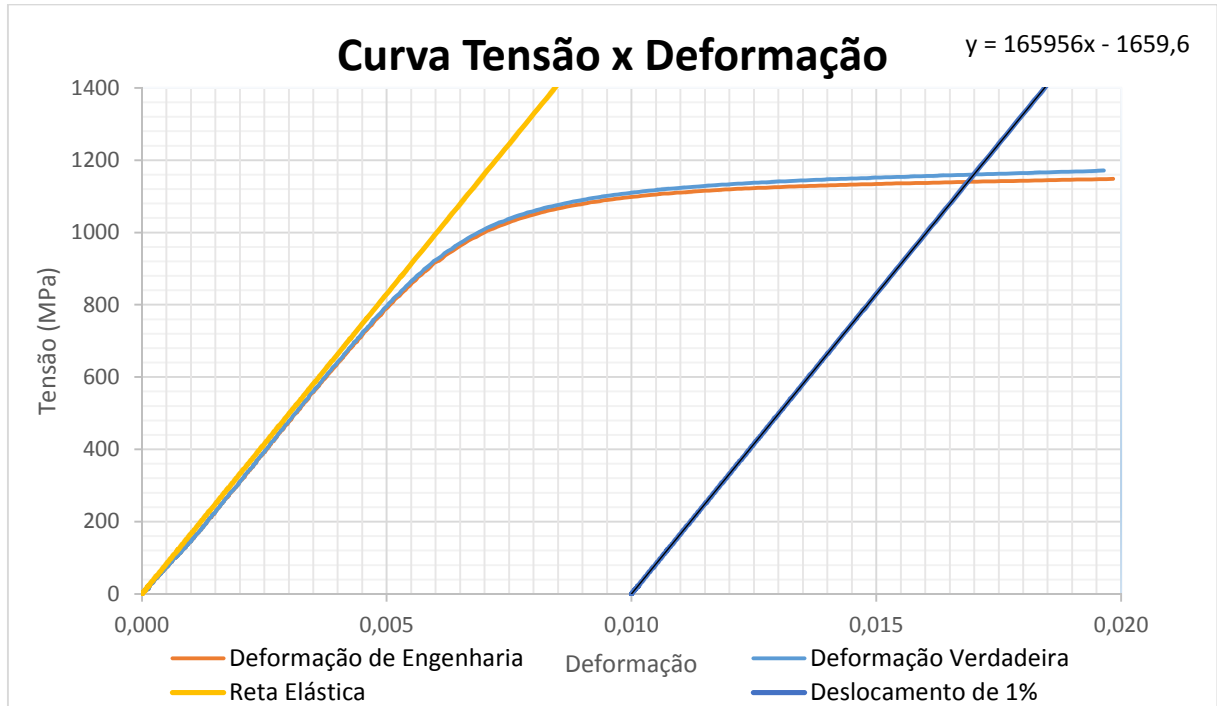
### ANEXO 23

Seguem os gráficos referente à amostra 4A\_01% CP4:



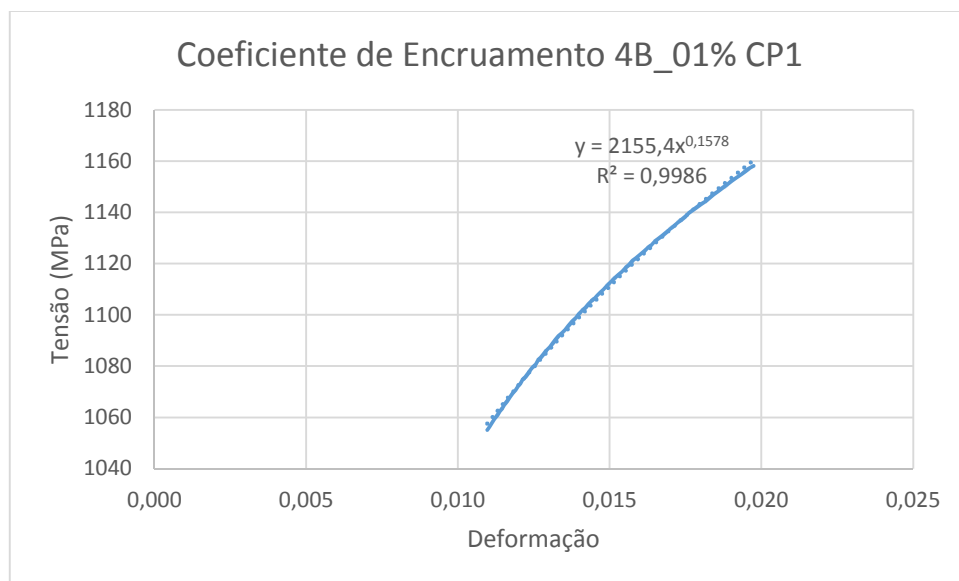
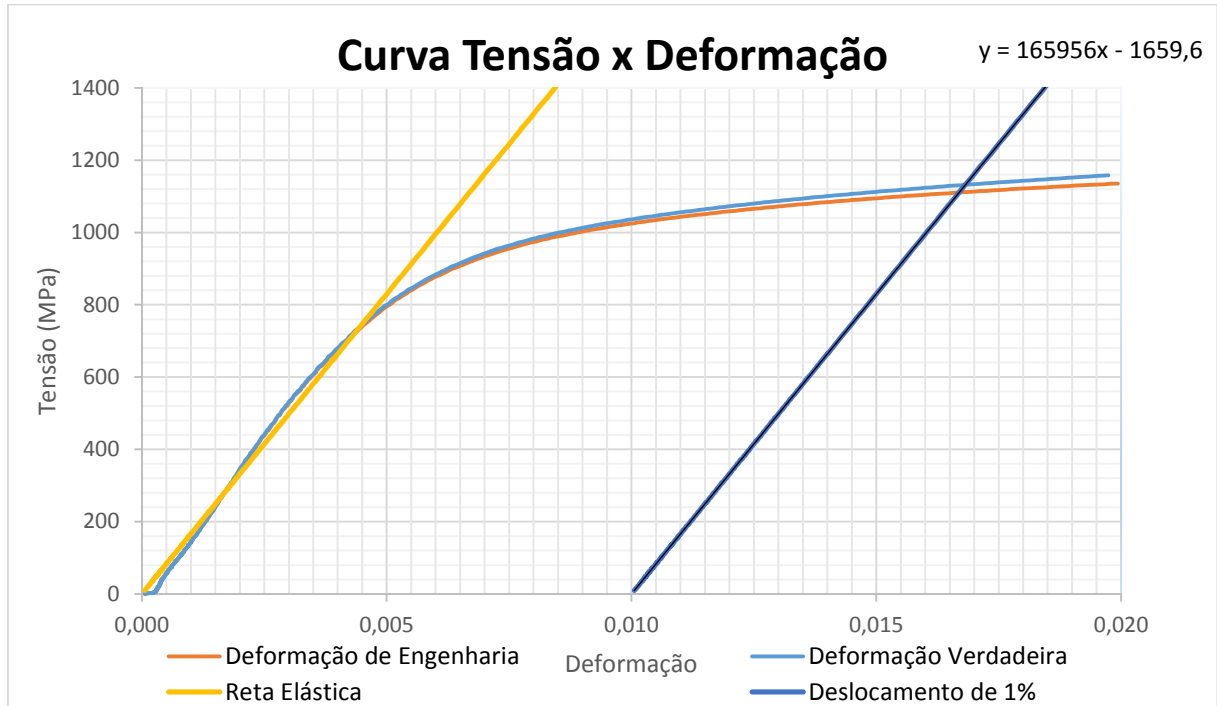
## ANEXO 24

Seguem os gráficos referente à amostra 4A\_01% CP5:



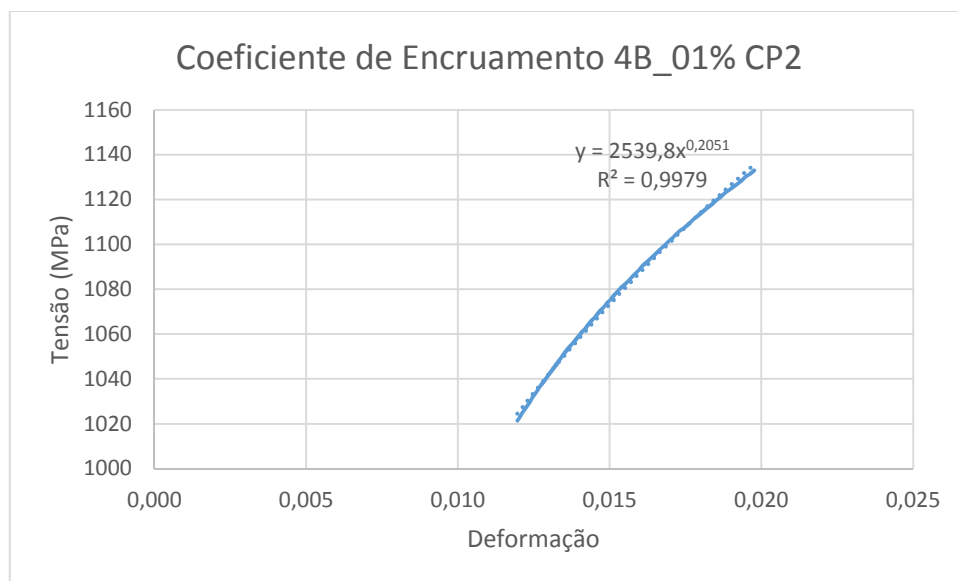
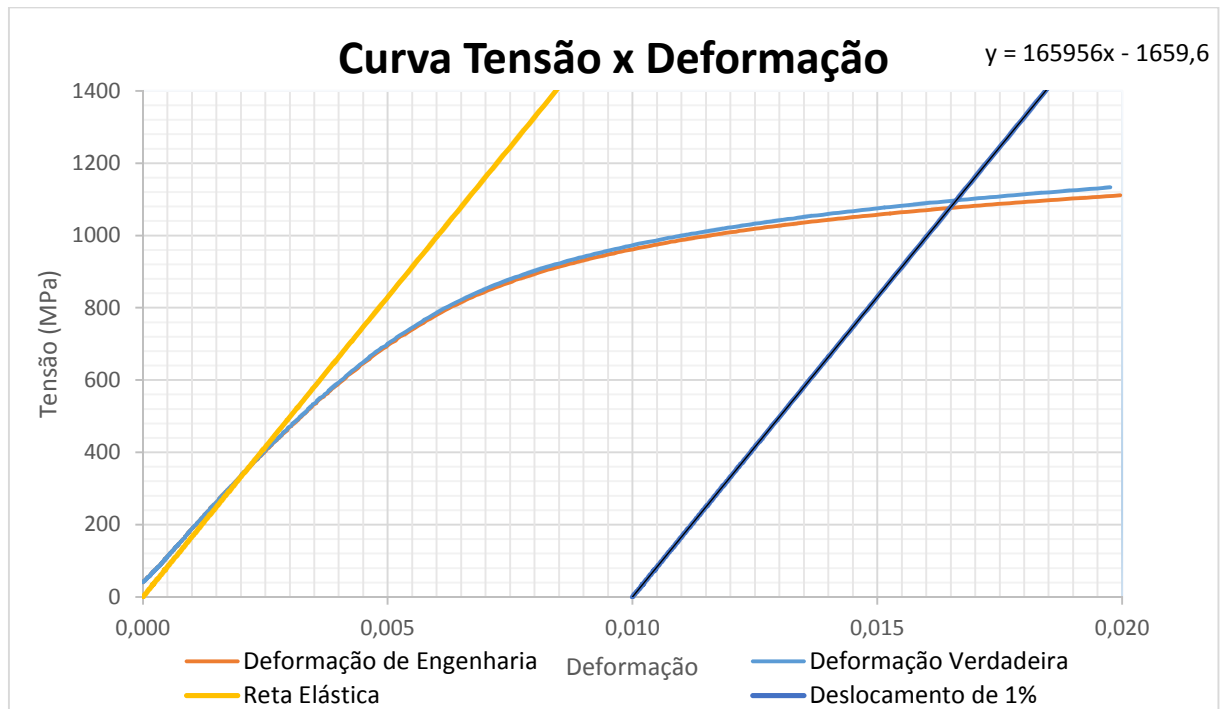
## ANEXO 25

Seguem os gráficos referente à amostra 4B\_01% CP1:



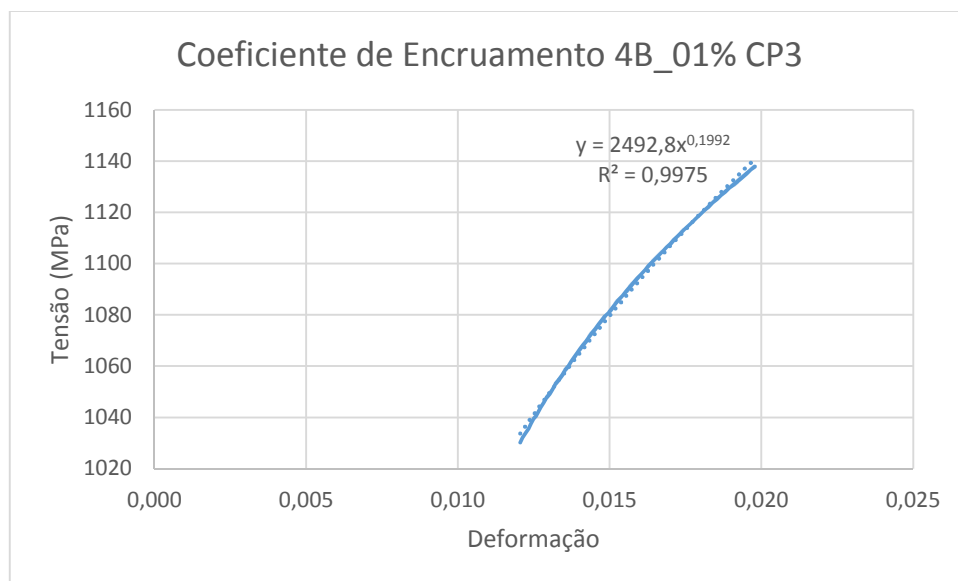
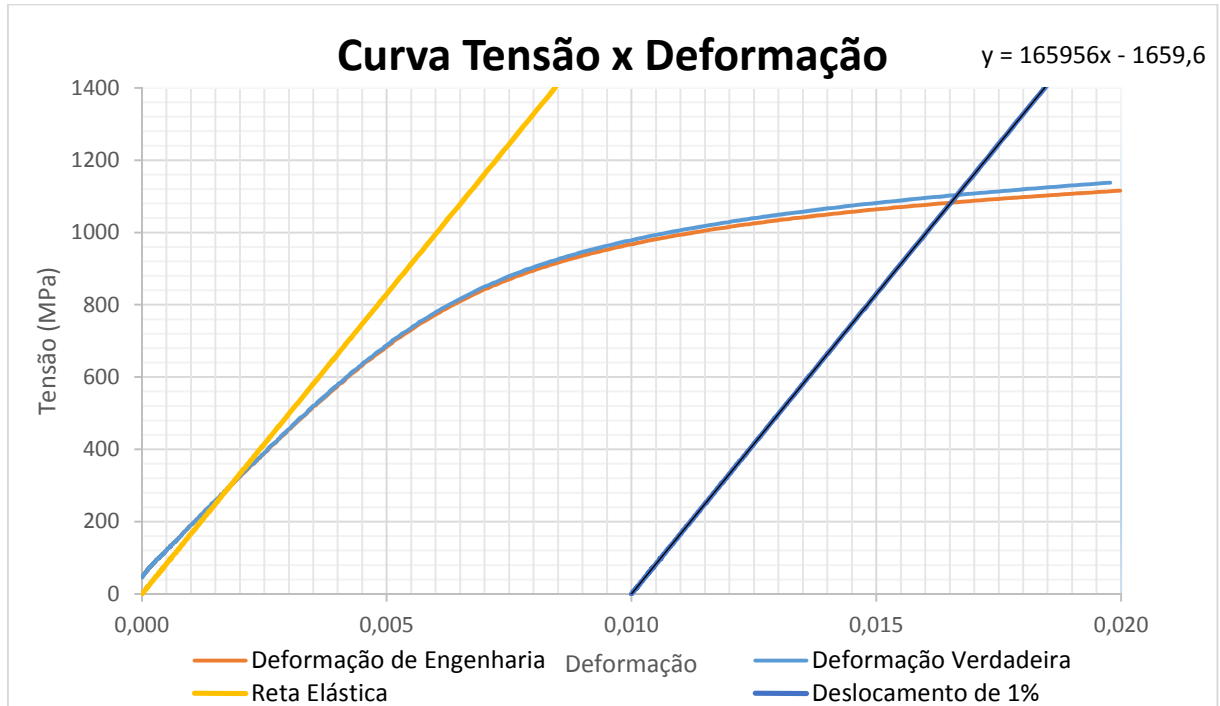
## ANEXO 26

Seguem os gráficos referente à amostra 4B\_01% CP2:



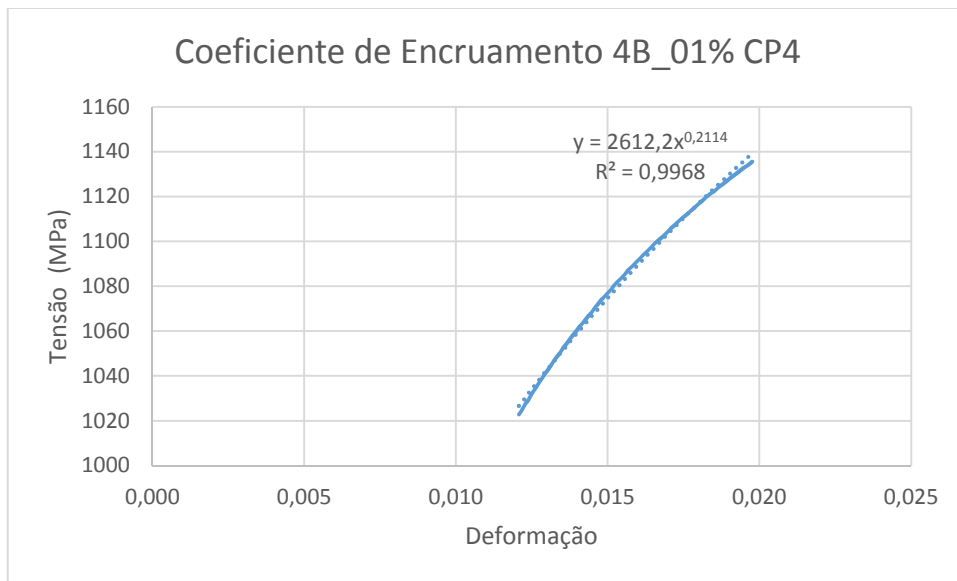
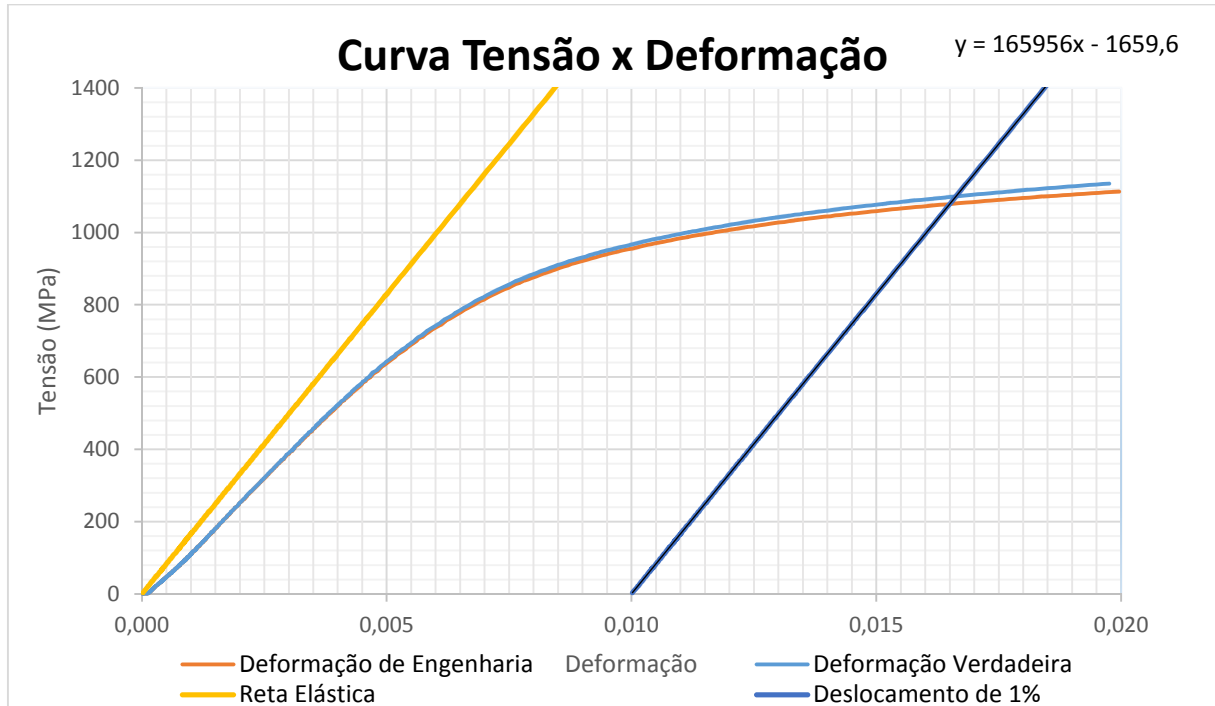
## ANEXO 27

Seguem os gráficos referente à amostra 4B\_01% CP3:



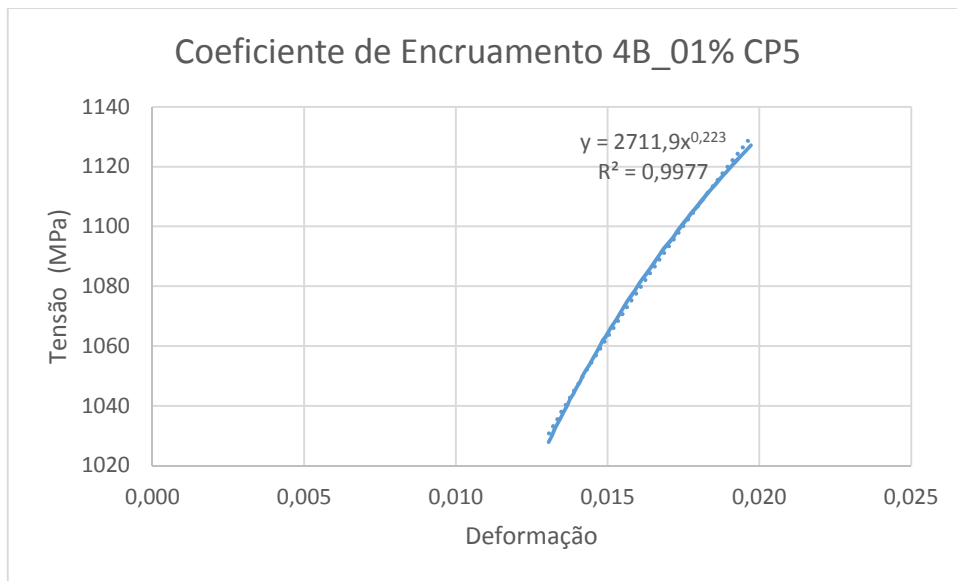
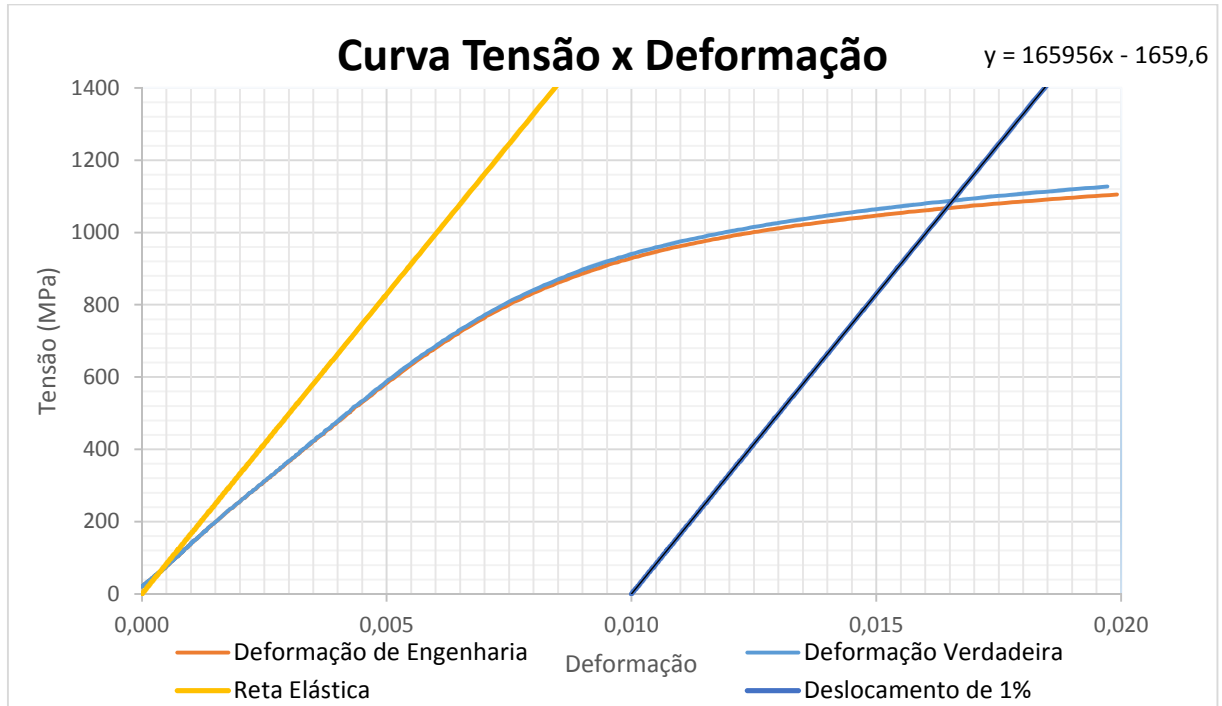
## ANEXO 28

Seguem os gráficos referente à amostra 4B\_01% CP4:



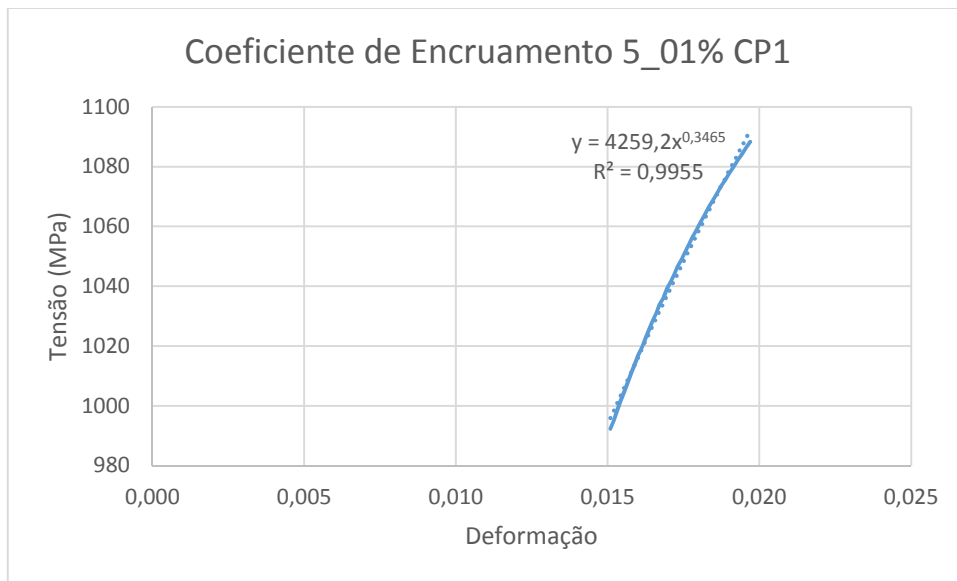
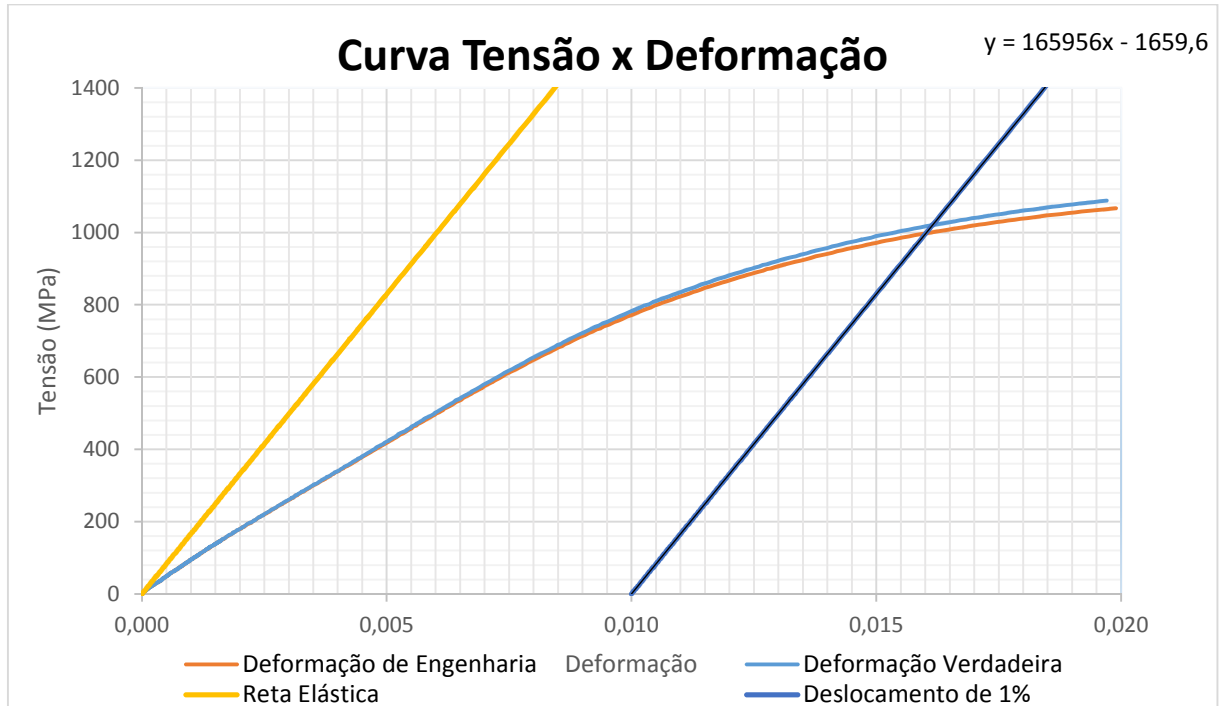
## ANEXO 29

Seguem os gráficos referente à amostra 4B\_01% CP5:



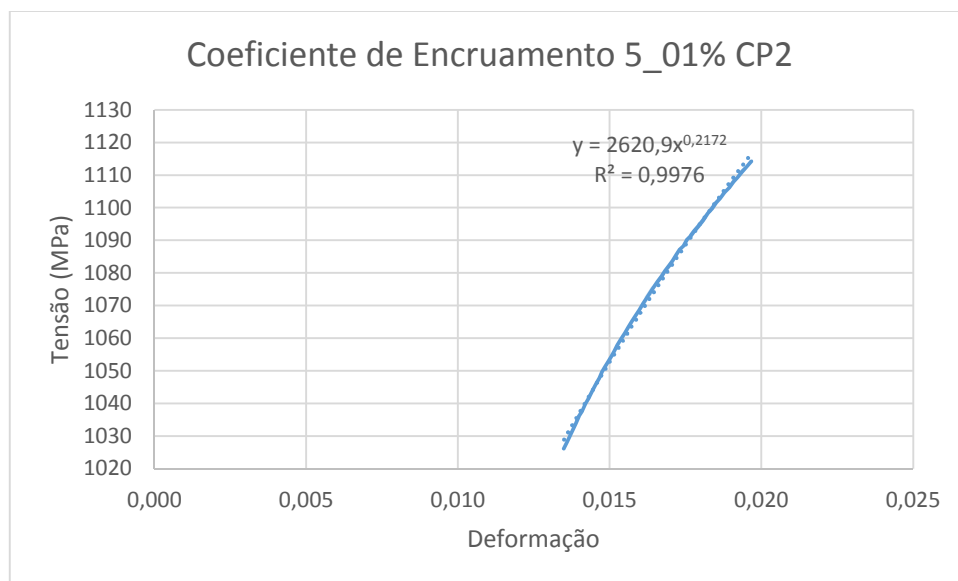
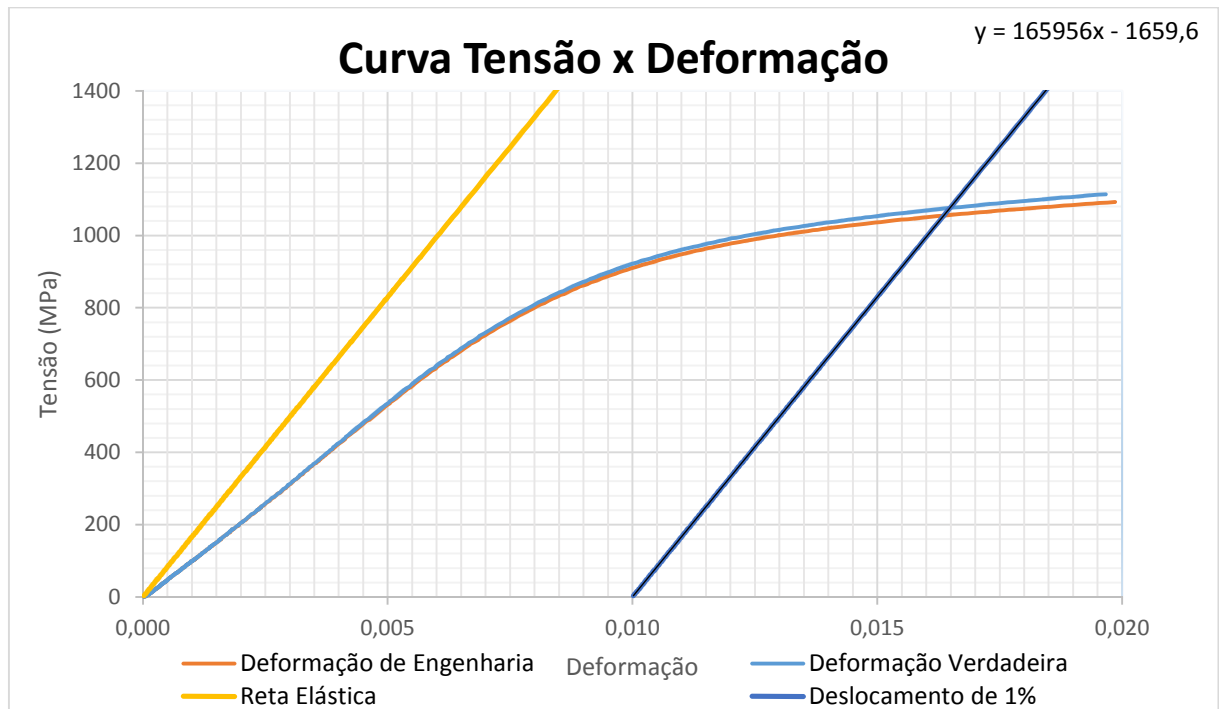
### ANEXO 30

Seguem os gráficos referente à amostra 5\_01% CP1:



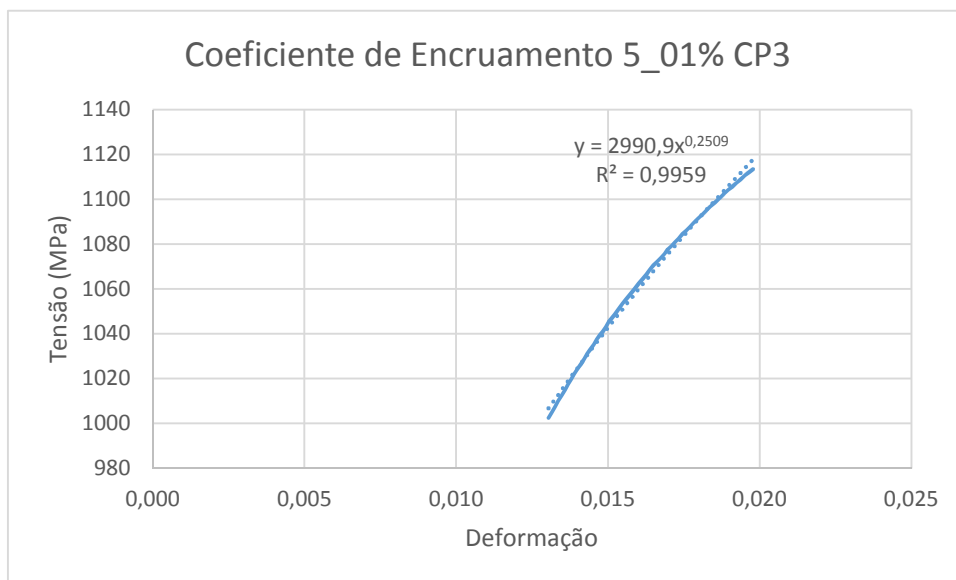
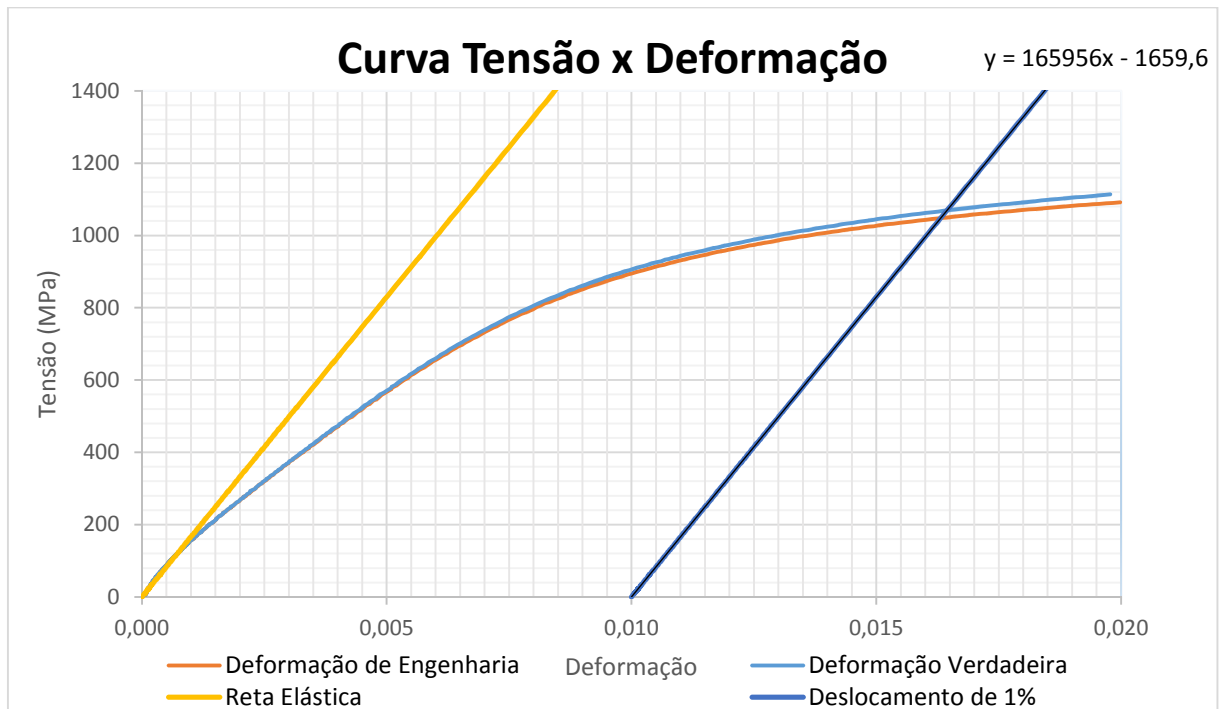
### ANEXO 31

Seguem os gráficos referente à amostra 5\_01% CP2:



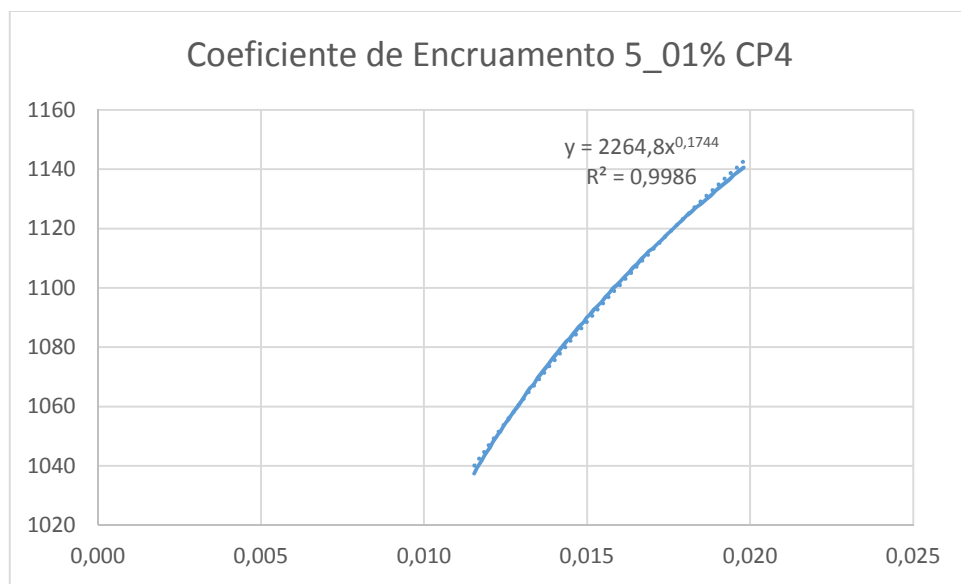
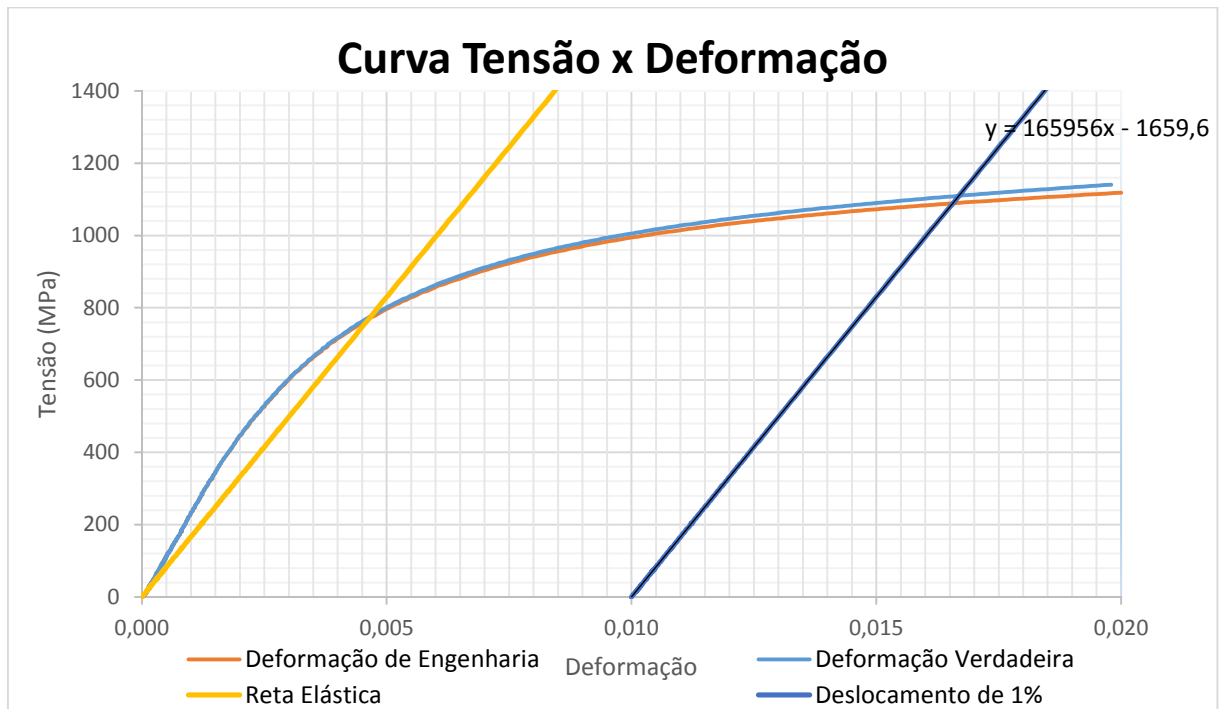
## ANEXO 32

Seguem os gráficos referente à amostra 5\_01% CP3:



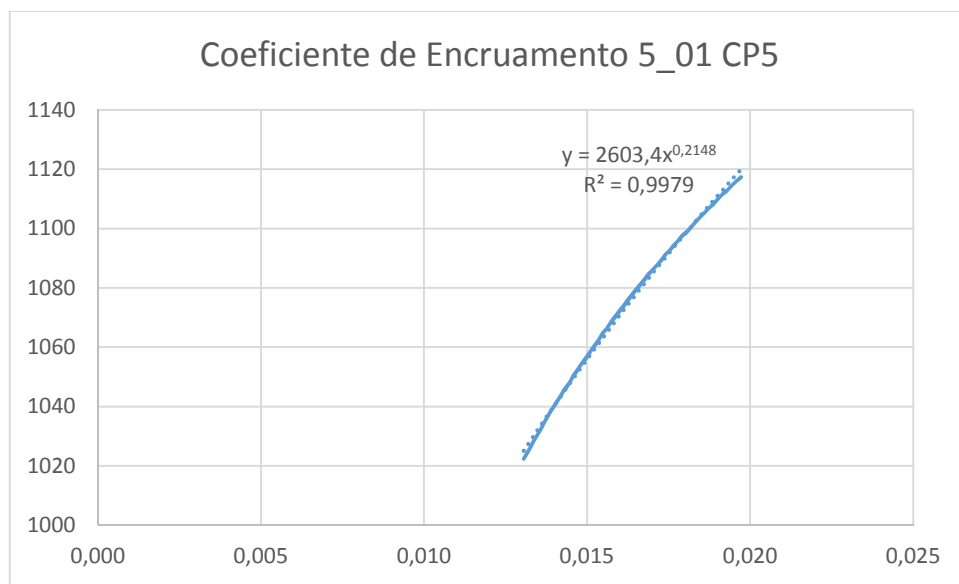
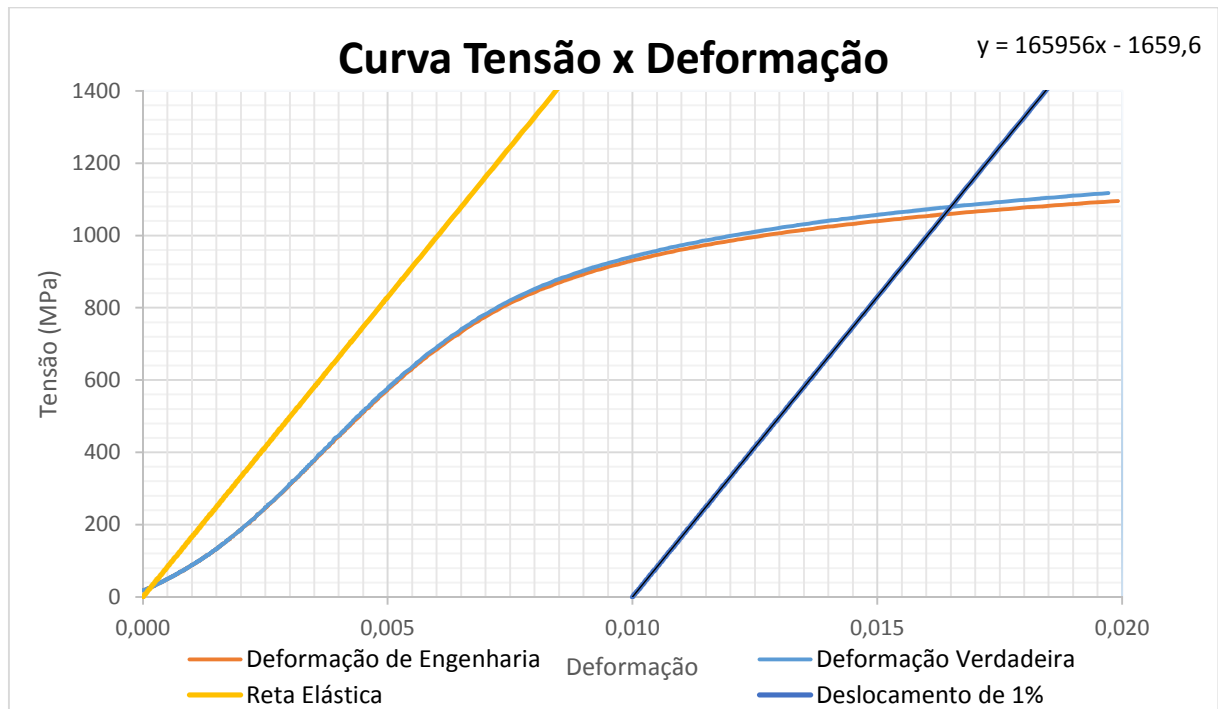
### ANEXO 33

Seguem os gráficos referente à amostra 5\_01% CP4:



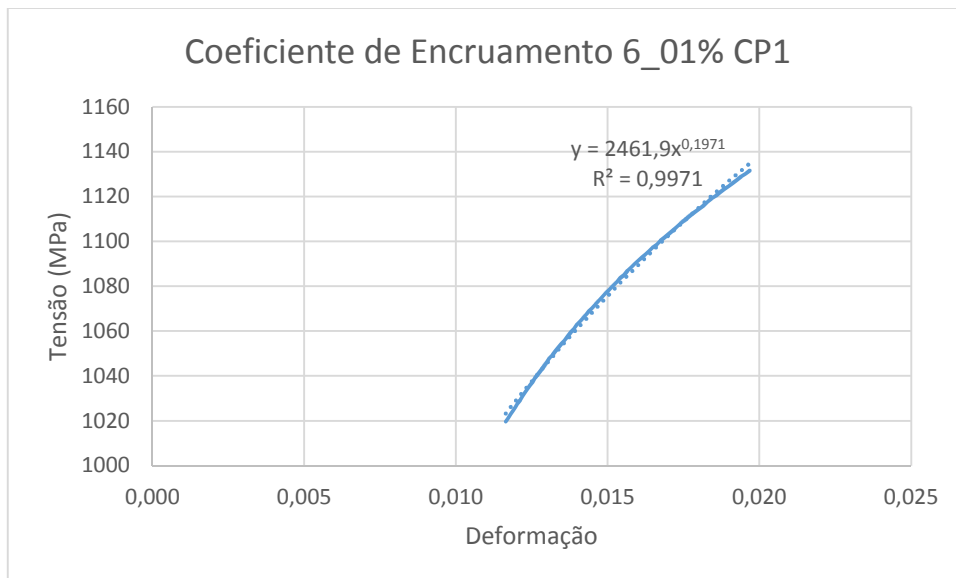
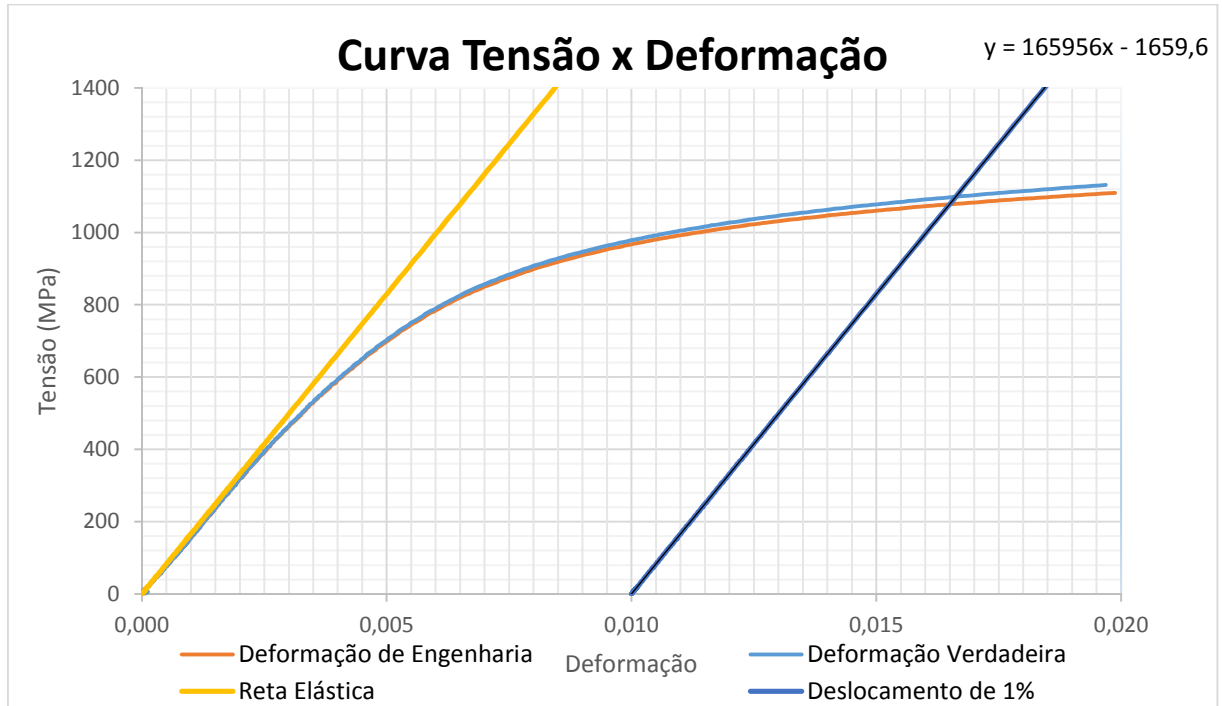
### ANEXO 34

Seguem os gráficos referente à amostra 5\_01% CP5:



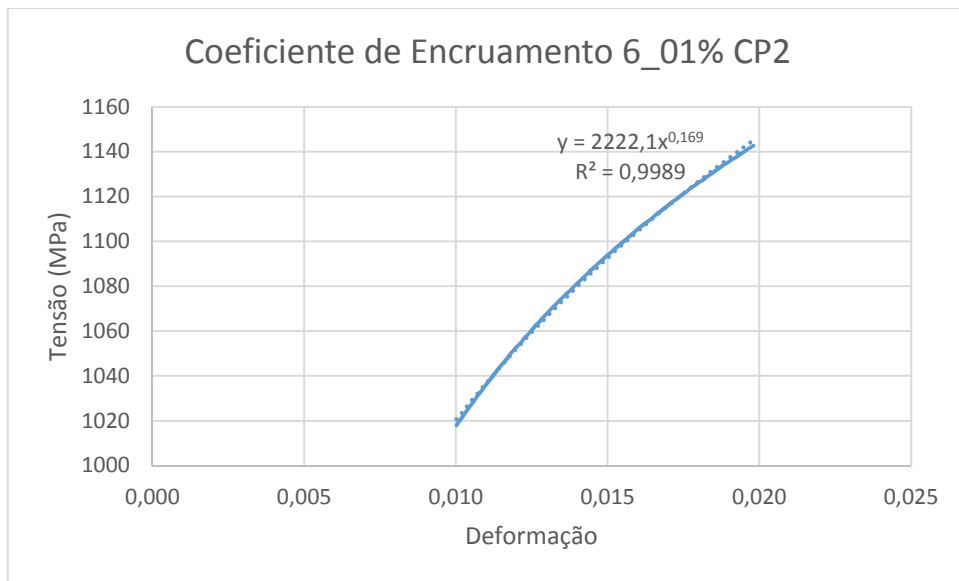
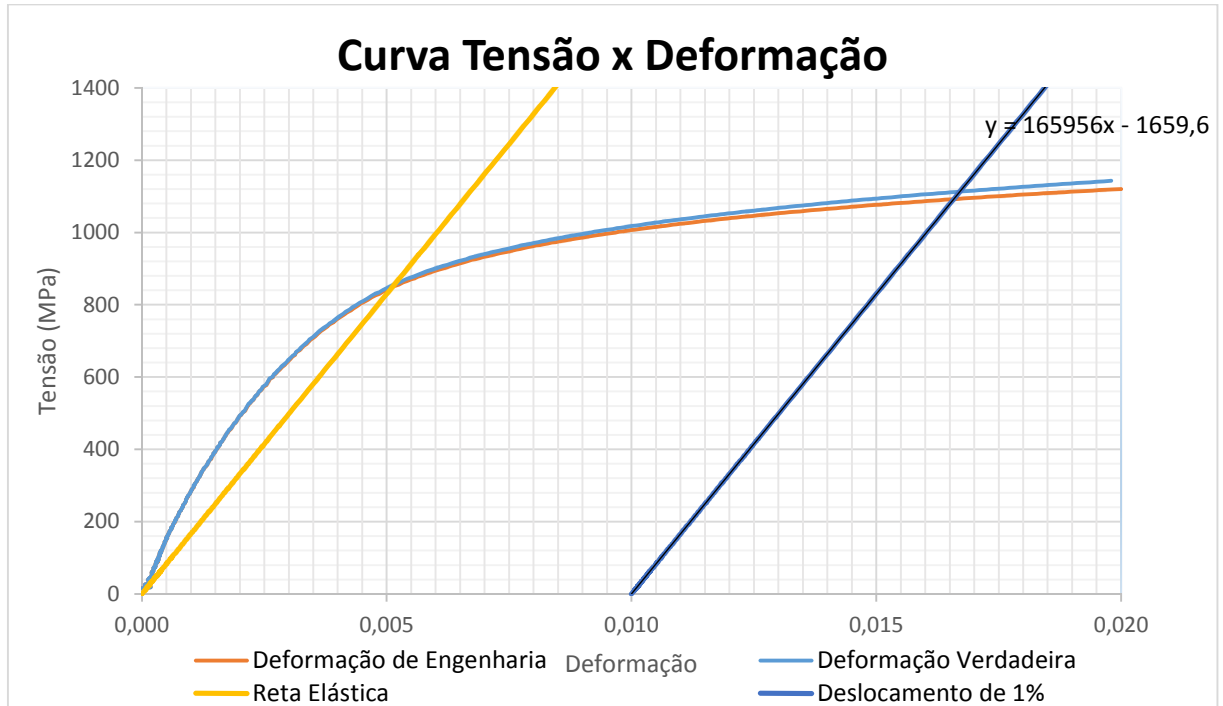
### ANEXO 35

Seguem os gráficos referente à amostra 6\_01% CP1:



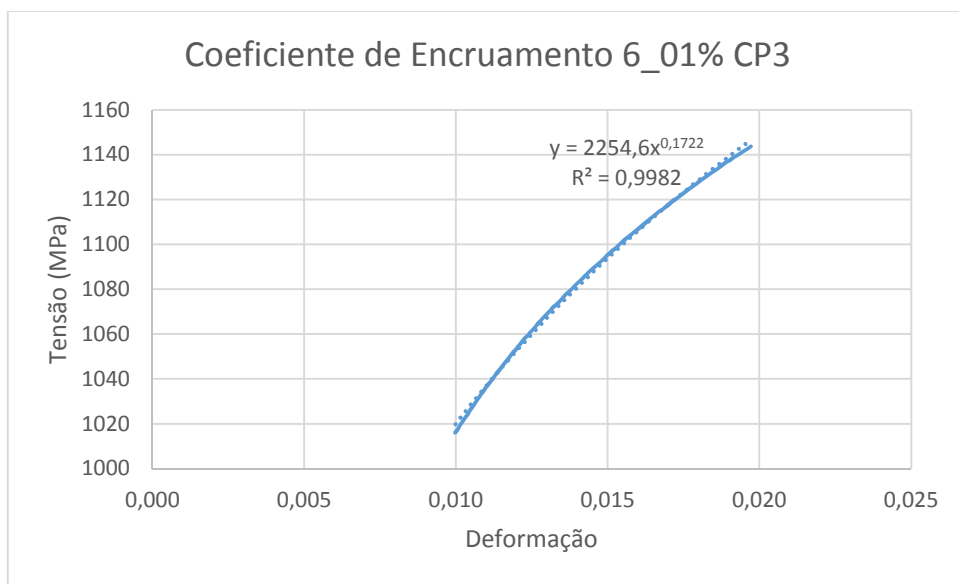
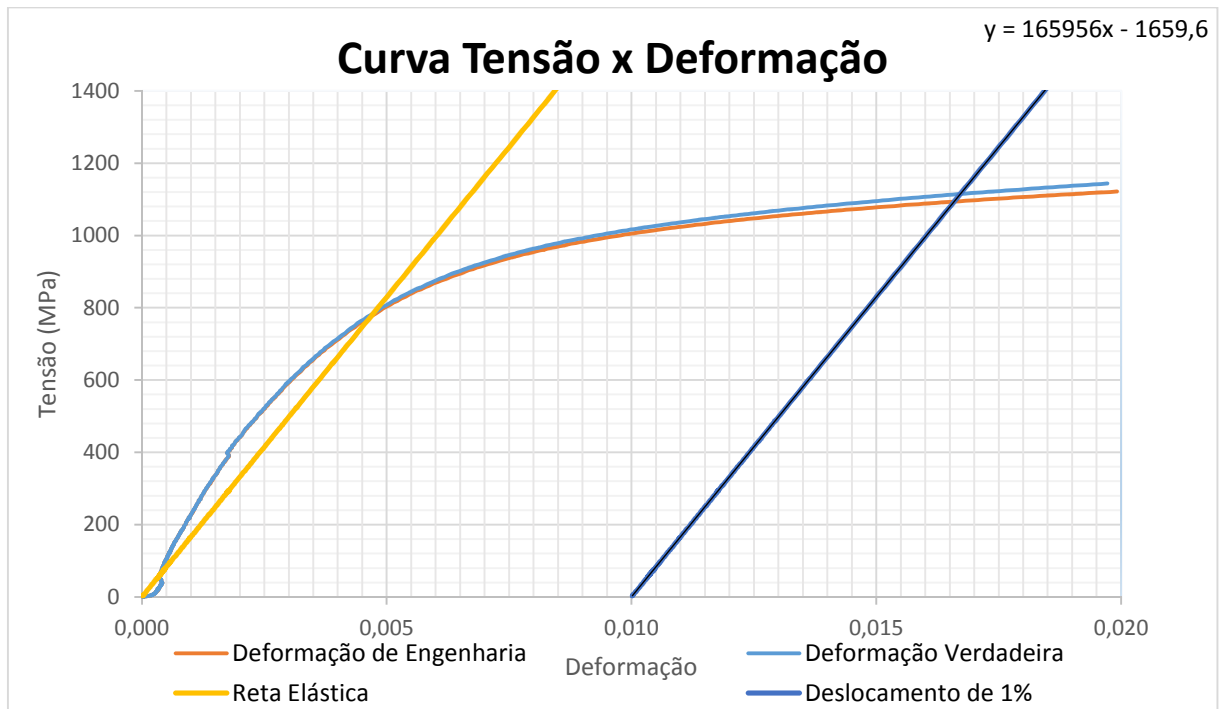
### ANEXO 36

Seguem os gráficos referente à amostra 6\_01% CP2:



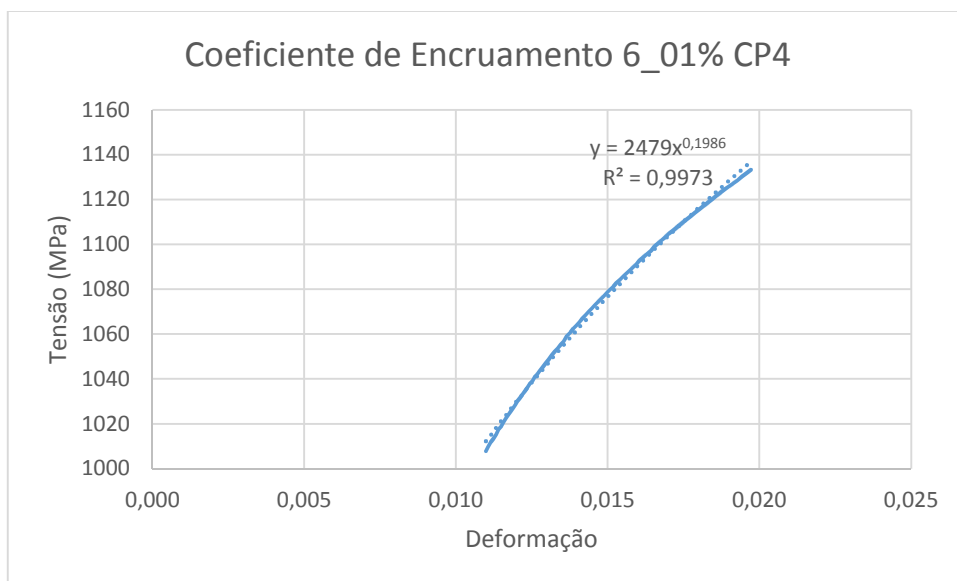
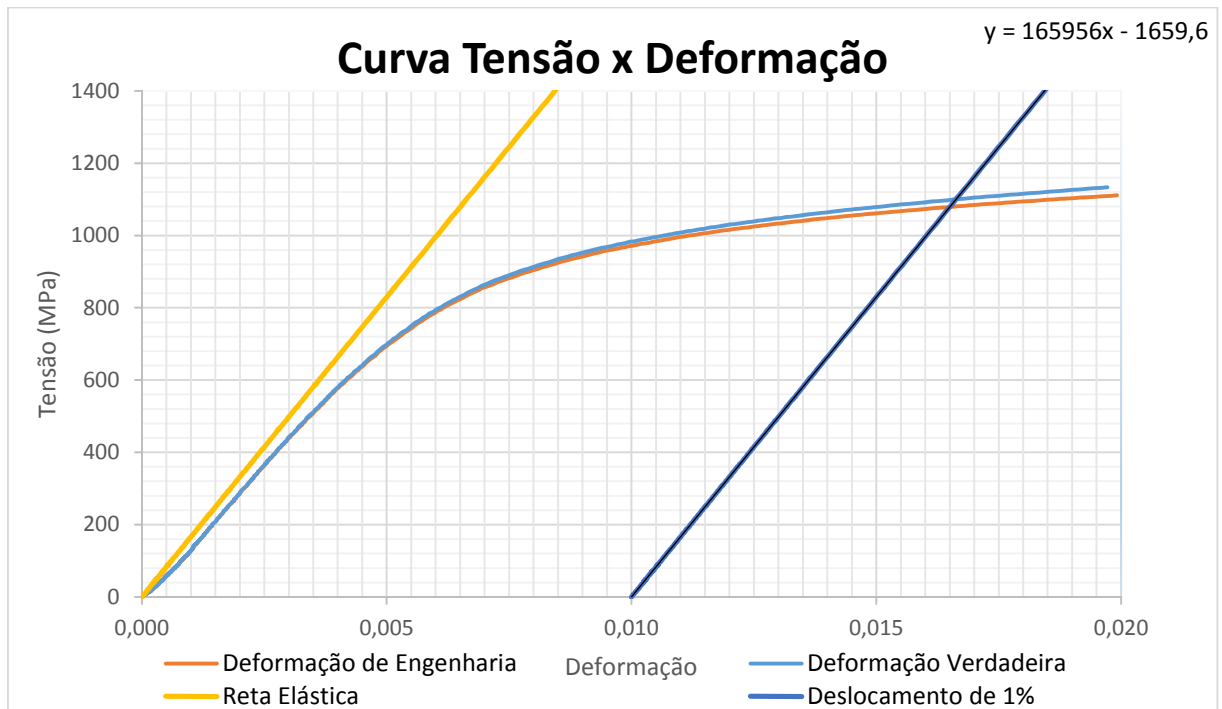
### ANEXO 37

Seguem os gráficos referente à amostra 6\_01% CP3:



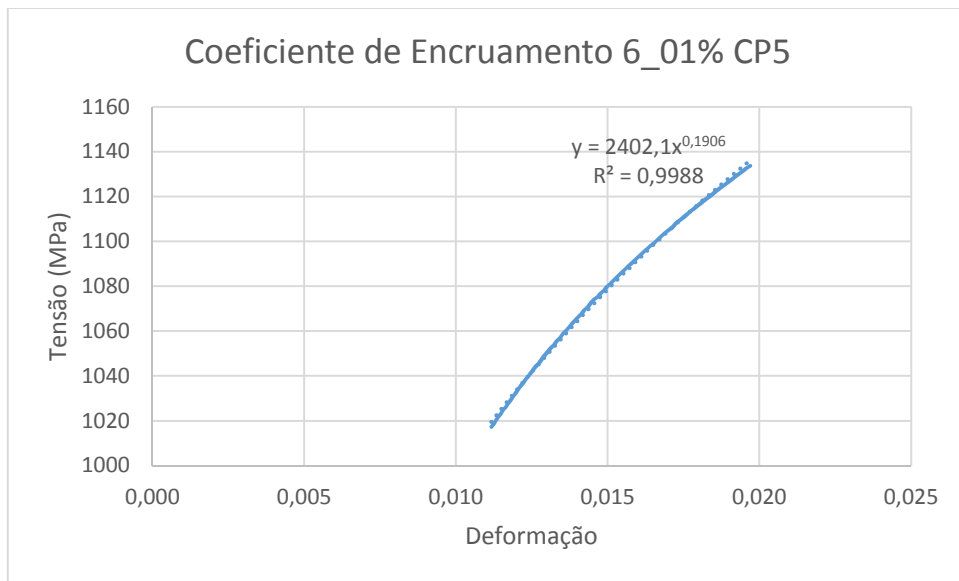
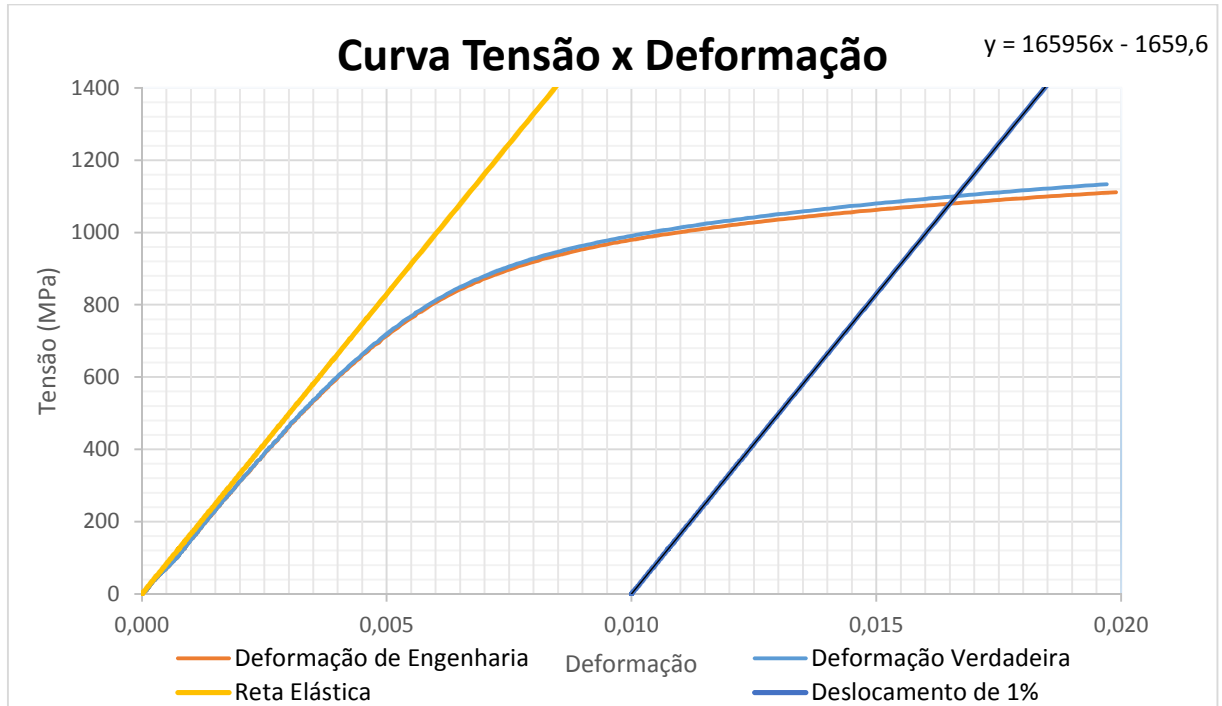
### ANEXO 38

Seguem os gráficos referente à amostra 6\_01% CP4:



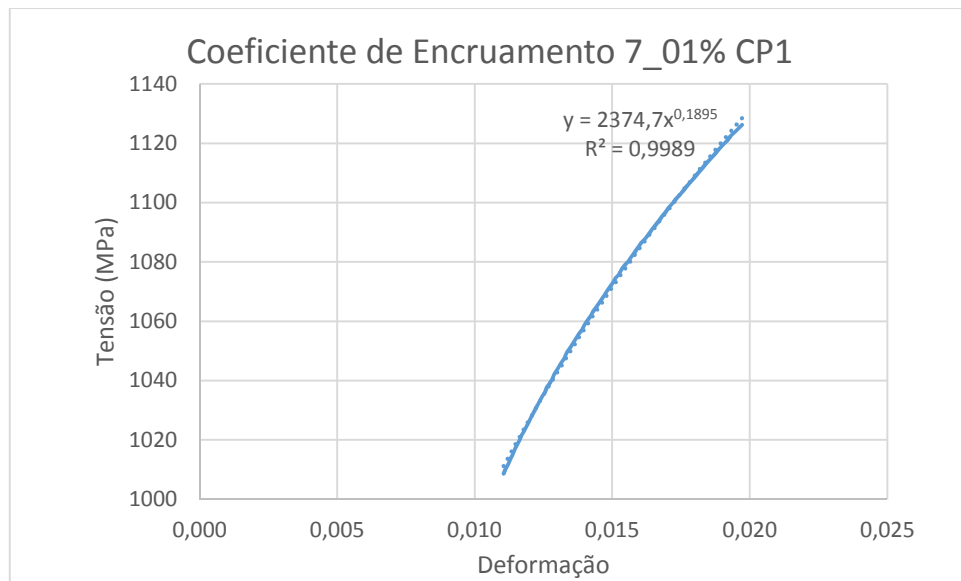
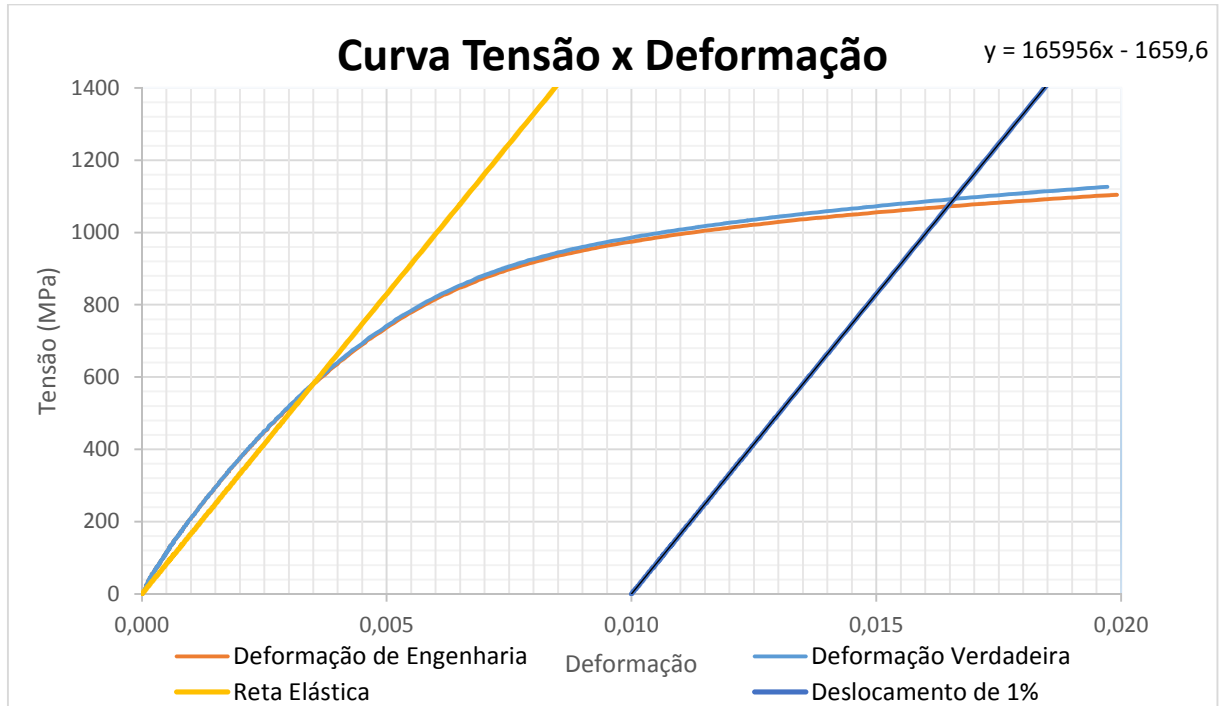
### ANEXO 39

Seguem os gráficos referente à amostra 6\_01% CP5:



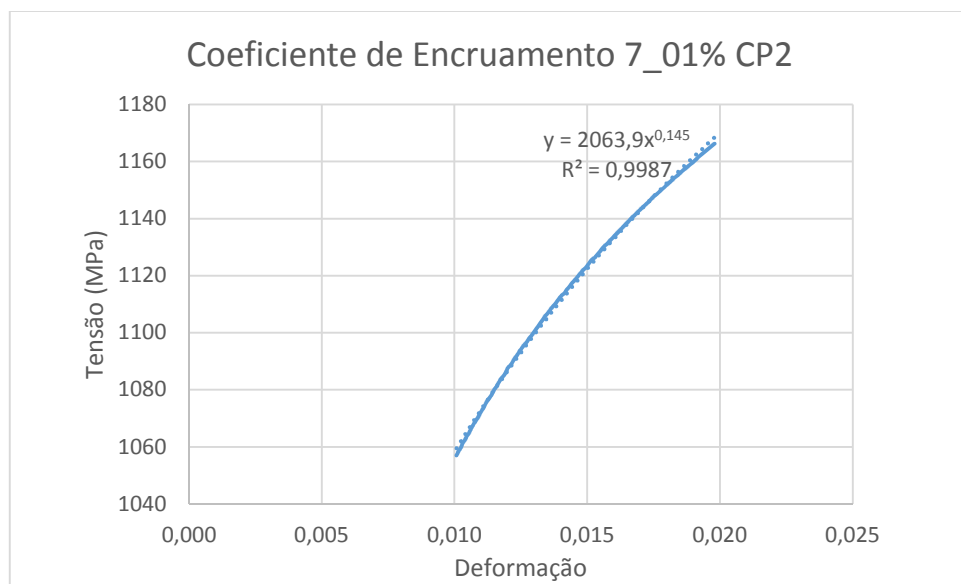
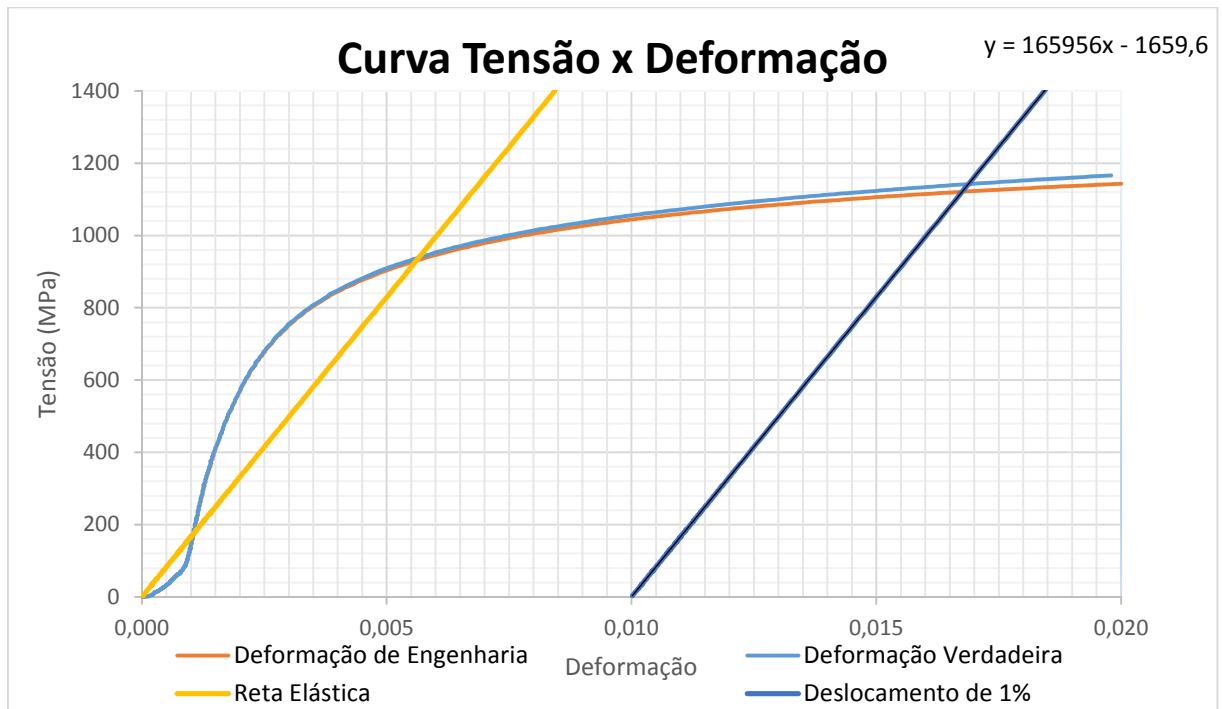
## ANEXO 40

Seguem os gráficos referente à amostra 7\_01% CP1:



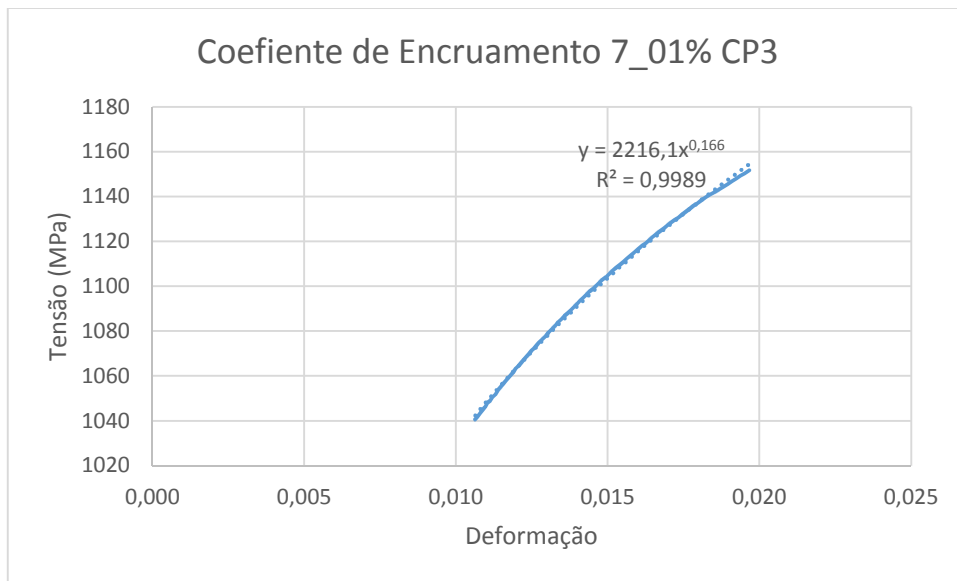
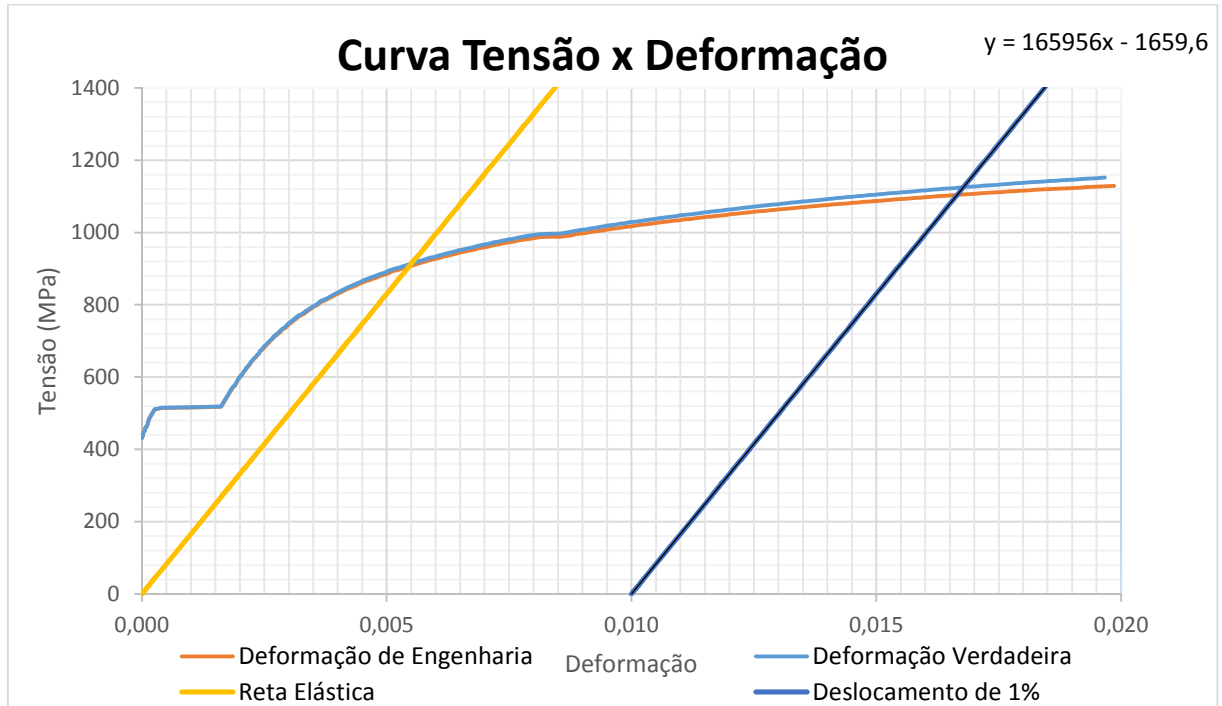
## ANEXO 41

Seguem os gráficos referente à amostra 7\_01% CP2:



## ANEXO 42

Seguem os gráficos referente à amostra 7\_01% CP3:



### ANEXO 43

Seguem os gráficos referente à amostra 7\_01% CP4:

