



Universidade de Aveiro
Ano 2023

**João Miguel Xavier
Pereira Fernandes**

**Análise da sensibilidade à mudança de trajetória de
deformação no aço avançado de terceira geração**



Universidade de Aveiro
Ano 2023

**João Miguel Xavier
Pereira Fernandes**

Análise da sensibilidade à mudança de trajetória de deformação no aço avançado de terceira geração

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica do Doutor António Manuel de Bastos Pereira, Professor Associado com Agregação, e da Doutora Gabriela Tamara Vincze, Professora Auxiliar, ambos do Departamento de Engenharia Mecânica de Aveiro.

O presente trabalho foi realizado ao abrigo do Projeto 2022.05783.PTDC – FCT-Fundação para a Ciência e Tecnologia, I.P./MCTES, na sua componente do Orçamento de Estado e ao abrigo do Projeto “Agenda ILLIANCE” [C644919832-00000035 | Projeto n.º 46], financiado pelo PRR – Programa de Recuperação e Resiliência, no âmbito do Next Generation EU da União Europeia, e contou com apoio laboratorial do Centro de Tecnologia Mecânica e Automação (TEMA), projetos UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020.

o júri

presidente

Prof. Doutor António Gil D'Orey de Andrade Campos

Professor auxiliar associado com agregação da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Augusto Luís Barros Lopes

Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira

Professor associado com agregação da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao Professor Doutor António Bastos pela orientação, apoio, disponibilidade e sugestões que possibilitaram a realização desta dissertação.

À Professora Doutora Gabriela Vincze, pelo fornecimento do material estudado e pelo apoio dado durante a atividade experimental e a realização dos cálculos.

Ao Engenheiro António Festas e ao Engenheiro Ricardo Beja pela ajuda na preparação dos objetos de estudo e na realização das atividades experimentais.

Aos meus pais, irmão, irmã, cunhado e sobrinha pela paciência e pelo apoio prestado durante estes anos académicos. Nunca deixaram que me faltasse nada, pelo que estarei sempre grato.

Aos meus amigos e a todas as pessoas que me cruzei, que tornaram esta jornada académica mais enriquecedora e que contribuíram para o meu desenvolvimento como pessoa.

palavras-chave

aço, ensaio de tração, deformação, tensão, direção de laminagem, aço avançado de alta resistência

resumo

O desenvolvimento de aços avançados de alta resistência (AHSS) chamou a atenção da indústria automóvel devido ao facto de estes terem características propícias, nomeadamente a grande resistência a choques e deformações, flexibilidade de projeto e peso baixo que culmina em melhorias ambientais e também económicas. Desde os anos 70 que se tem estudado este tipo de aços de modo a satisfazer as necessidades do setor automóvel. Atualmente encontra-se em desenvolvimento a terceira geração de aços avançados de alta resistência, com a finalidade de combinar as características existentes nos aços das gerações anteriores, mas sempre com o objetivo de atingir uma elevada resistência e ductilidade.

Este trabalho teve como objetivo analisar as propriedades mecânicas de um aço avançado de terceira geração denominado por CR980XG3. Para realizar este trabalho, foram feitos ensaios de tração em provetes do material de modo a obter as curvas tensão-deformação e calcular propriedades como o módulo de elasticidade, tensão limite de elasticidade, tensão máxima, deformação uniforme, anisotropia, encruamento. Estas propriedades foram calculadas para três orientações diferentes em relação à direção de laminagem e para três valores de pré-deformações. Assim avaliou-se a alteração de trajetória para os ângulos a 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminagem, para as pré-deformações de 5%, 10%, 15%. Analisando os resultados, foi possível observar deformações superiores a 20% e tensões máximas na ordem dos 1100 MPa nos provetes de maiores dimensões, significando que se trata de um material que apresenta simultaneamente alta ductilidade e resistência mecânica. Em relação aos provetes de menores dimensões, notou-se valores maiores de anisotropia e encruamento nos provetes com orientação de 90° em relação às outras orientações, registando-se valores superiores a 1,35 de coeficiente anisotropia e de coeficiente encruamento maiores que 0,105 neste tipo de provetes. Relativamente à trajetória de deformação, verificou-se a existência do efeito de Bauschinger para os ângulos de 90° e 45° entre pré-deformação e recarga.

keywords

steel, tensile test, strain, stress, rolling direction, advanced high-strength steel

abstract

The development of advanced high-strength steels (AHSS) has attracted the attention of the automotive industry due to their favorable characteristics, including high resistance to collisions and deformations, design flexibility, and low weight, which results in environmental and economic improvements. Since the 1970s, there have been studies and developments in this type of steel to meet the needs of the automotive sector. Currently, the development of the third generation of advanced high-strength steels is underway, aiming to fill the gaps in previous generations of steels while still achieving high strength and ductility.

This work aimed to analyze the mechanical properties of an advanced third generation steel called CR980XG3. To carry out this work, tensile tests were carried out on specimens of the material in order to obtain a stress-strain graph and calculate properties such as modulus of elasticity, yield stress, maximum tensile strength, uniform deformation, anisotropy, work hardening, among others. These properties were calculated for three different orientations with respect to direction and for three pre-strains. Thus, the trajectory alteration was evaluated for angles at 0° , 45° and 90° in relation to the rolling direction, for pre-strains of 5%, 10%, 15%. Analyzing the results, it was possible to observe deformations greater than 20% and maximum stresses in the order of 1100 MPa in the larger specimens, meaning that this is a material that has simultaneously high ductility and mechanical resistance. Regarding the smaller specimens, higher values of anisotropy and hardening were observed in the specimens oriented at 90° in relation to the other orientations, registering values greater than 1.20 for anisotropy and hardening greater than 0.15 in this type of test pieces. There was also a decrease in the yield strength in the specimens with orientation of 45° and 90° , thus resulting in a change in their deformation trajectories (Bauschinger Effect).

Índice

Índice	i
Lista de figuras.....	iii
Lista de tabelas	vi
Lista de símbolos	vii
Capítulo 1: Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Guia de leitura	2
Capítulo 2 – Fundamentos teóricos.....	3
2.1 Desenvolvimento e evolução dos aços	3
2.2 Aços avançados de alta resistência	4
2.3 Aços Q&P	5
2.4 Aços TBF assistidos por TRIP.....	7
2.5 Apresentação do aço estudado	9
2.6 Influências da alteração da trajetória de deformação	10
2.6.1 Tensão de recarga	10
2.6.2 Pré-deformação.....	11
2.6.3 Amplitude da alteração da trajetória de deformação.....	12
2.7 Ensaio de tração	13
2.8 Propriedades mecânicas.....	14
2.9 Encruamento	16
2.10 Anisotropia	17
2.11 Coeficiente de Poisson	20
Capítulo 3 – Descrição do procedimento experimental.....	23
Capítulo 4 - Análise de Resultados	35
4.1 Gráficos tensão-deformação	35
4.2 Propriedades mecânicas.....	39
4.3 Encruamento	41
4.4 Anisotropia	44
4.5 Coeficiente de Poisson	47
4.6 Alteração da trajetória de deformação	48

Capítulo 5 – Conclusões gerais e propostas de futuros trabalhos	49
5.1 Conclusão.....	49
5.2 Propostas de trabalhos futuros	50
Bibliografia.....	51
ANEXOS.....	55
Anexo A – Folhetos com características e propriedades do aço CR980XG3.....	56
Anexo B – Tabela da lente de 50mm do Aramis	58
Anexo C – Calibrador MV90XT72 e respetivo suporte	59
Anexo D – Distribuição de deformações no provete em diferentes zonas de deformação, calculadas pelo software Aramis	60
Anexo D1 – Zona elástica inicial	60
Anexo D2: Final da zona elástica	61
Anexo D3: Zona próxima do ponto de tensão máxima	62
Anexo D4: Início da zona de estrição	63
Anexo D5: Zona pré-ruptura.....	64
Anexo E: Gráficos tensão-deformação real dos provetes para diferentes pré-deformações e direções de laminagem.....	65
Anexo F: Exemplo de gráfico para encontrar o módulo de Young	70
Anexo G: Exemplo de gráfico para encontrar a tensão limite de elasticidade	70

Lista de figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 - Diferentes partes de um automóvel constituídas por aços de alta resistência.....	3
Figura 2.2 - Gráfico que relaciona a resistência à tração com a deformação total de AHSS (aços avançados de alta resistência).....	4
Figura 2.3 - Representação do tratamento térmico efetuado para processamento de aços Q&P).....	6
Figura 2.4 – Gráfico tensão-deformação real e de engenharia típicos de um aço Q&P.....	7
Figura 2.5 – Representação do tratamento térmico efetuado para processamento de aços TBF assistidos por TRIP.....	8
Figura 2.6 – Gráfico tensão-deformação de um aço TBF assistido por TRIP.....	8
Figura 2.7 – Comparação entre o aço CR980XG3 e aços Dual-Phase em termos de conformabilidade e resistência.....	9
Figura 2.8 – Gráficos tensão-deformação real para o aço em estudo e para aços DP.....	9
Figura 2.9 – Curvas tensão-deformação tipicamente obtidas em ensaios de tração uniaxial de materiais pré-deformados.....	10
Figura 2.10 – Efeito do valor de pré-deformação no valor de deformação plástica homogénea residual no aço macio deformado segundo trajetórias ortogonais de tração-tração.....	11
Figura 2.11 – Valor de α para ensaios sequenciais de tração uniaxial em função do ângulo da orientação em relação à direção de laminagem num material isotrópico.....	12
Figura 2.12 – Representação esquemática de um ensaio de tração.....	13
Figura 2.13 - Gráfico comum de tensão-deformação de um aço submetido a um ensaio de tração.....	14
Figura 2.14 - Formato de um provete retangular para ensaio de tração uniaxial.....	14

Figura 2.15 – Gráfico dos logaritmos da tensão e deformação verdadeira para achar o coeficiente de encruamento.....	17
Figura 2.16 – Exemplos de provetes em diferentes direções em relação à direção de laminagem numa chapa de aço.....	18
Figura 2.17 - Exemplo de “orelhamento” de um material devido à sua anisotropia planar.....	20
 Capítulo 3	
Figura 3.1 - Guilhotina e máquina utilizada para corte e maquinagem dos provetes.....	23
Figura 3.2 - Geometria dos provetes de maiores dimensões.....	23
Figura 3.3 - Representação esquemática do comprimento da zona útil de um provete antes e depois do ensaio de tração.....	24
Figura 3.4 - Máquina Shimadzu UH-1000 kN X.....	25
Figura 3.5 - Calibragem através das tiras de "diamantes"	25
Figura 3.6 - Interface do software Trapezium que comanda a máquina Shimadzu.....	26
Figura 3.7 - Geometria dos provetes de menores dimensões.....	27
Figura 3.8 - Desenho dos provetes pequenos em diferentes direções de laminagem no provete maior.....	27
Figura 3.9 – a) Provetes depois de serem cortados na guilhotina; b) Provetes após maquinagem.....	28
Figura 3.10 - Equipamentos utilizados na atividade experimental.....	29
Figura 3.11 – Padrões de tinta.....	29
Figura 3.12 – Provette pintado de acordo com o padrão 65x52mm.....	30
Figura 3.13 -Equipamento configurado e pronto a ser utilizado.....	30
Figura 3.14 - Interface do software ARAMIS.....	31
Figura 3.15 - Representação da deformação através do gradiente de cores com escala colorida associada a gráfico que quantifica a presença de cada cor.....	32

Figura 3.16 – Seleção dos parâmetros desejados, calculados pelo software.....	33
---	----

Capítulo 4

Figura 4.1 – Gráficos tensão-deformação para cada pré-deformação efetuada nos provetes de maiores dimensões.....	35
--	----

Figura 4.2 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 5% e com orientação de 0° em relação à direção de laminagem.....	36
---	----

Figura 4.3 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 5% e com orientação de 45° em relação à direção de laminagem.....	36
--	----

Figura 4.4 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 5% e com orientação de 90° em relação à direção de laminagem.....	37
--	----

Figura 4.5 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 10% e com orientação de 0° em relação à direção de laminagem.....	37
--	----

Figura 4.6 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 10% e com orientação de 45° em relação à direção de laminagem.....	37
---	----

Figura 4.7 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 10% e com orientação de 90° em relação à direção de laminagem.....	38
---	----

Figura 4.8 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 15% e com orientação de 0° em relação à direção de laminagem.....	38
--	----

Figura 4.9 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 15% e com orientação de 45° em relação à direção de laminagem.....	38
---	----

Figura 4.10 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 15% e com orientação de 90° em relação à direção de laminagem.....	39
--	----

Figura 4.11 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes sem pré-deformações.....	39
--	----

Figura 4.12 – Gráficos logaritmo da deformação verdadeira vs logaritmo da tensão verdadeira para cada pré-deformação e direção de laminagem com o objetivo de calcular n	42
--	----

Figura 4.13 – Gráficos da deformação da espessura e da deformação da largura com o objetivo de calcular o coeficiente de anisotropia, r , para cada pré-deformação e direção de laminagem.....	46
--	----

Figura 4.14 - Gráficos tensão-deformação real dos provetes de diferentes pré-deformações e orientações em relação à direção de laminagem.....48

Lista de tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1 - Propriedades de um aço Q&P.....7

Tabela 2.2 - Propriedades de um aço TBF assistido por TRIP.....8

Tabela 2.3 - Algumas propriedades do aço em estudo.....10

Tabela 2.4 - Anisotropia normal de alguns materiais.....20

Capítulo 4

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas avaliadas para os provetes com pré-deformação de 5% relativamente às três direções em estudo.....40

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas avaliadas para os provetes com pré-deformação de 10% relativamente às três direções em estudo.....40

Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas avaliadas para os provetes com pré-deformação de 15% relativamente às três direções em estudo.....40

Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas avaliadas para os provetes sem pré-deformação....40

Tabela 4.5 - Valores de coeficiente de encruamento, n , e constante plástica de resistência, K , para cada uma das pré-deformações e direções de laminagem.....43

Tabela 4.6 - Valores de anisotropia para cada direção estudada, de anisotropia normal e anisotropia planar para uma pré-deformação de 5%.....46

Tabela 4.7 - Valores de anisotropia para cada direção estudada, de anisotropia normal e anisotropia planar para uma pré-deformação de 10%.....46

Tabela 4.8 - Valores de anisotropia para cada direção estudada, de anisotropia normal e anisotropia planar para uma pré-deformação de 15%.....47

Tabela 4.9 - Valores de coeficiente de Poisson na zona elástica para cada pré-deformação e direção de laminagem.....47

Lista de símbolos

A	Área
AHSS	Aço avançado de alta resistência (<i>Advanced High Strength Steel</i>)
A_0	Área inicial
C	Carbono
CP	Complex-Phase
DP	Aços Bifásicos (<i>Dual-Phase</i>)
E	Módulo de Young ou elasticidade
F	Força
HS	Alta resistência (<i>High Strength</i>)
HSLA	Alta resistência e liga baixa (<i>High Strength Low-Alloy</i>)
HSS	Aços de alta resistência (<i>High strength steel</i>)
LIP	Aços leves com plasticidade induzida (<i>Lightweight Induced Plasticity</i>)
TRIP	Transformação induzida por deformação (<i>Transforming induced plasticity</i>)
TWIP	Deformação induzida por maclação (<i>Twinning induced plasticity</i>)
UHSS	Ultra aços de alta resistência (<i>Ultra high strength steel</i>)
l	Comprimento final
l_0	Comprimento inicial
n	Coefficiente de encruamento
r	Coefficiente de anisotropia ou de Lankford
r_m	Anisotropia média

r_x	Anisotropia para uma direção x de laminagem
r_0	Anisotropia na direção 0° em relação à direção de laminagem
r_{45}	Anisotropia na direção 45° em relação à direção de laminagem
r_{90}	Anisotropia na direção 90° em relação à direção de laminagem
t	Espessura
t_0	Espessura inicial
w	Largura
w_0	Largura inicial
Δr	Anisotropia planar
ε	Deformação / Deformação de engenharia
ε_l	Deformação longitudinal
ε_t	Deformação na espessura
ε_{tot}	Deformação total / Alongamento total
ε_u	Deformação uniforme
ε_v	Deformação verdadeira ou real
ε_w	Deformação na largura
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão nominal
σ_e	Tensão limite de elasticidade
σ_e/σ_{max}	Razão elástica
σ_{max}	Tensão máxima
σ_v	Tensão verdadeira ou real

Capítulo 1: Introdução

1.1 Enquadramento

Os aços avançados de alta resistência, AHSS, desempenham um papel fundamental na indústria automóvel moderna, fornecendo uma série de benefícios que contribuem para a eficiência, segurança e desempenho dos veículos. Esses materiais são uma evolução significativa em relação aos aços convencionais, pois possuem propriedades mecânicas superiores, incluindo alta resistência à tração, rigidez, tenacidade e resistência à fadiga. Este tipo de aço é projetado para atender às necessidades cada vez maiores da indústria automóvel em termos de redução de peso, economia de combustível e segurança automóvel. Com a crescente preocupação com as emissões de carbono e o aumento dos padrões de eficiência de combustível, os produtores de automóveis estão constantemente à procura de formas de reduzir o peso dos veículos sem comprometer a segurança. Os aços avançados de alta resistência desempenham um papel crucial nesse contexto, pois têm uma excelente relação entre resistência e peso, permitindo a construção de veículos mais leves, mas ainda assim robustos [1].

Um dos benefícios mais significativos dos aços avançados de alta resistência é a redução de peso que eles proporcionam aos veículos. Ao substituir componentes feitas de aços convencionais por aços avançados mais resistentes, é possível reduzir significativamente o peso total do veículo. Isso, por sua vez, leva a uma série de vantagens, como melhor eficiência de combustível, menor consumo de energia, menor desgaste dos pneus e melhor desempenho geral. Além disso, os aços avançados de alta resistência também oferecem maior flexibilidade de projeto para os fabricantes de automóveis.

Esses materiais podem ser conformados de forma mais complexa do que os aços convencionais, permitindo a criação de componentes e estruturas mais aerodinâmicas e eficientes [1-3].

Outro aspecto importante na utilização de aços avançados de alta resistência na indústria automóvel, também tem um impacto significativo na sustentabilidade ambiental. A redução de peso proporcionada por esses materiais resulta em menor consumo de combustível e emissões de gases. Além disso, a maior durabilidade e vida útil dos veículos fabricados com aços avançados reduzem a necessidade de substituição frequente de veículos, resultando em menor geração de resíduos e menor procura de recursos naturais [1-3].

Dados estes fatores, é fundamental estudar e desenvolver novos aços de alta resistência para satisfazer as necessidades da indústria.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento de um aço avançado de terceira geração, AHSS, para diferentes trajetórias de deformação e avaliá-lo em diferentes orientações em relação à direção de laminagem e para pré-deformações distintas.

Através de ensaios de tração uniaxial em provetes de aço de alta resistência de terceira geração, é possível identificar propriedades como o módulo de elasticidade, tensão limite de elasticidade, tensão máxima admitida pelo material, deformação uniforme, deformação máxima, coeficiente de encruamento, entre outras. Calculando estas propriedades, é possível caracterizar o aço relativamente à sua elasticidade e plasticidade, e a sua eficácia em determinados processos de fabrico.

1.3 Guia de leitura

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, sendo que neste presente capítulo, apresenta-se uma breve introdução do tema do trabalho, assim como os principais objetivos a atingir.

No segundo capítulo, são apresentados conteúdos teóricos acerca da história e evolução dos aços de alta resistência, assim como as fórmulas necessárias para o cálculo das propriedades mecânicas.

O terceiro capítulo é dedicado à apresentação de todo o procedimento experimental realizado neste trabalho.

No quarto capítulo encontram-se os resultados obtidos nos ensaios de tração e análise dos mesmos.

Finalmente, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões finais deste trabalho, assim como algumas propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Fundamentos teóricos

2.1 Desenvolvimento e evolução dos aços

O avanço contínuo da tecnologia no fabrico de produtos duráveis para atender às exigências cada vez maiores das pessoas, tem impulsionado o desenvolvimento de novos materiais. Encontrar materiais que sejam acessíveis em termos de custo e capazes de atender aos diversos requisitos mecânicos, químicos e físicos das diferentes aplicações sempre foi um desafio. No entanto, os aços se destacam nesse aspecto devido à sua elevada versatilidade. Os aços são amplamente utilizados em diversas áreas devido à capacidade de adquirir diferentes conjuntos de propriedades por meio de uma seleção cuidadosa de sua composição, incluindo os elementos de liga, e do seu processamento térmico e mecânico [4].

A criação dos novos aços de alta resistência, foi impulsionada pela crise do petróleo em 1973, quando o aumento significativo dos preços dos combustíveis levou à necessidade de reduzir o consumo. Nesse contexto, a indústria automóvel começou a procurar soluções para diminuir o peso dos veículos. Como resultado, os órgãos reguladores do setor automóvel passaram a emitir regulamentações com o objetivo de abordar questões ambientais e, ao mesmo tempo, garantir a segurança dos ocupantes dos veículos [4-6].

O desafio de reduzir o peso dos veículos e, ao mesmo tempo, aumentar sua resistência a impactos tornou a indústria automotiva extremamente competitiva. Isso, por sua vez, impulsionou o desenvolvimento contínuo da indústria metalúrgica, melhorando constantemente as propriedades dos aços existentes e também resultando no aparecimento de novos tipos de aços, como os aços Dual-Phase, Martensíticos, TRIP e TWIP [4-6].

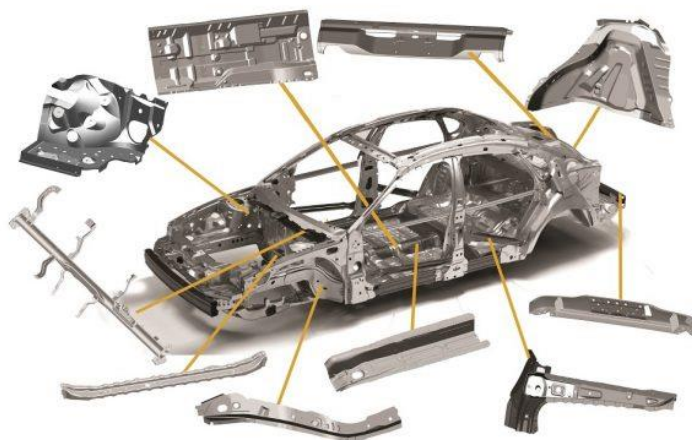


Figura 2.1 - Diferentes partes de um automóvel constituídas por aços de alta resistência (adaptado de [7])

2.2 Aços avançados de alta resistência

Os aços podem ser classificados de várias formas, como por exemplo, pela sua denominação metalúrgica. Deste modo, os aços podem dividir-se em três categorias:

- Aços de baixa resistência – aço ao carbono e *interstitial free* (IF);
- Aços convencionais de alta resistência (*High strength steel* - HSS) – C-Mn, IF de alta resistência e *high strength low alloy* (HSLA);
- Aços avançados de alta resistência (*Advanced high strength steel* - AHSS) e aços de alta resistência (*Ultra high strength steel* - UHSS) - *Dual-phase* (DP), *Complex-phase* (CP), Ferrítico-bainíticos, Martensíticos, Transformação induzida por deformação - *Transformation induced plasticity* (TRIP) e Transformação induzida por maclação – *Twinning induced plasticity* (TWIP) [8].

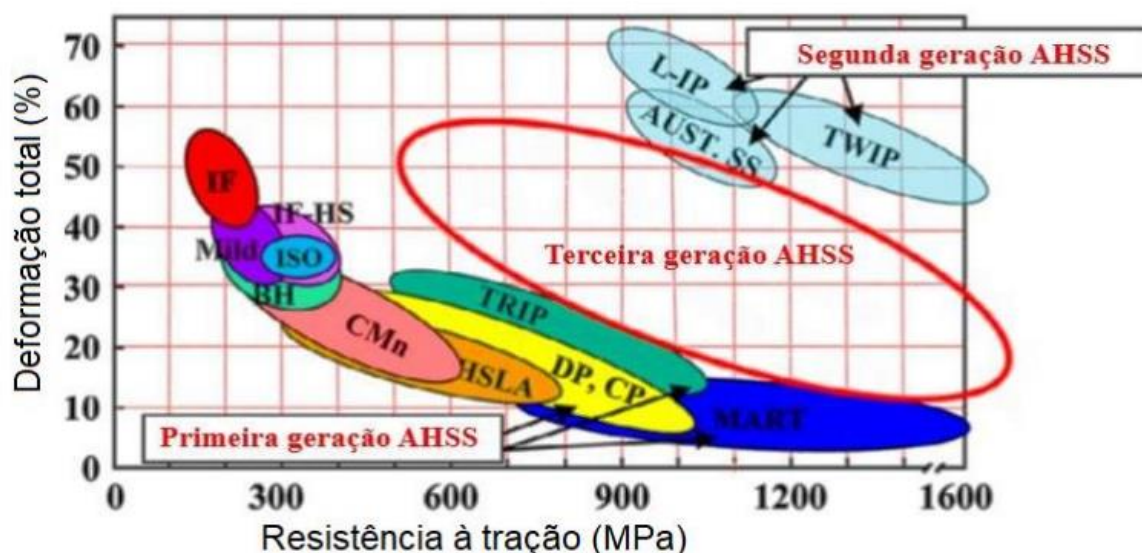


Figura 2.2 - Gráfico que relaciona a resistência à tração com a deformação total de AHSS (aços avançados de alta resistência), adaptado de [9]

A primeira geração de aços avançados de alta resistência inclui os aços bifásicos (*dual phase* - DP), os de fases complexas (*complex phase* - CP) que apresentam elevada resistência mecânica e as ligas que apresentam o efeito TRIP, proporcionando maior absorção de energia em eventuais colisões. Em termos de propriedades mecânicas, a primeira geração de AHSS exibe valores de resistência à tração, em média, acima de 600 MPa e uma ductilidade abaixo de 20%, características que restringem a aplicação destes materiais em componentes automóveis com formas complexas [10].

Para atender às exigências de redução do peso dos veículos, do aumento da complexidade dos componentes, da diminuição da quantidade de componentes soldados, e simultaneamente obter valores altos de ductilidade e resistência mecânica, foi

desenvolvida a segunda geração dos aços avançados de alta resistência. Esta geração inclui os aços TWIP (*Twinning Induced Plasticity*), que foram projetados com elevados teores de manganês, adquirindo valores acima de 700 MPa de resistência à tração, percentagens de deformação total superiores a 50% e elevadas taxas de encruamento, além de aços leves com plasticidade induzida (*lightweight induced plasticity* - LIP) e aços inoxidáveis austeníticos. Contudo esta nova geração de aços, apesar de apresentar propriedades excelentes de resistência à tração e de ductilidade, apresentaram elevados custos e dificuldades na produção em série. Portanto foi necessário o desenvolvimento de uma nova geração de AHSS (*Advanced High-Strength Steel*) [10-11].

O principal objetivo no desenvolvimento dos aços de alta resistência (AHSS) de terceira geração foi alcançar propriedades que se encontram entre os AHSS de primeira e segunda geração, com uma menor quantidade de elementos de liga. Isso resulta em um processamento menos dispendioso, tornando-os adequados para comercialização. No diagrama de resistência à tração vs deformação total, é possível identificar claramente o grupo de desenvolvimento dos AHSS de terceira geração entre as regiões dos AHSS de primeira e segunda geração (Figura 2.2).

Os aços de médio manganês que combinam os efeitos TRIP (transformação induzida por pressão) e TWIP (aumento da plasticidade induzida por maclagem) e os aços temperados e particionados (Q&P), bem como os aços bainíticos-ferríticos (TBF) assistidos por TRIP e os nanoaços, são geralmente considerados pertencentes a esse grupo de AHSS.

Atualmente, existem dois exemplos promissores desse grupo: os aços temperados e particionados (Q&P) e os aços bainíticos-ferríticos (TBF) assistidos por TRIP [10-11].

2.3 Aços Q&P

Os aços temperados e particionados (Q&P) são um dos principais resultados dos recentes desenvolvimentos dos aços AHSS de 3ª geração. A teoria dos aços Q&P é parcialmente baseada no conhecimento dos aços inoxidáveis duplex e do processo de têmpera e particionamento. Os aços Q&P geralmente contêm carbono, manganês, silício, níquel e molibdênio como elementos de liga. A quantidade de elementos de liga é de cerca de 4%, o que é muito inferior do AHSS de 2ª geração. Durante o tratamento térmico do aço Q&P, a têmpera é interrompida e reaquescida para particionamento. Com este processo de reaquescimento, uma microestrutura única é formada, contendo 5 a 12% de austenite retida estável, 20 a 40% de ferrite e 50 a 80% de martensite.

No processo Q&P, o aço é arrefecido abaixo da temperatura do começo de aparecimento da martensite, onde a austenite não é totalmente transformada. Isso possibilita que a microestrutura possa ser uma mistura de martensite e austenite. O aço é então reaquescido e o envelhecimento é concluído entre 300–500 °C, finalizando-se assim a etapa de particionamento.

Durante este tratamento, o carbono difunde-se da martensite saturada, proporcionando o enriquecimento de carbono da austenite, que aumenta sua estabilidade à temperatura ambiente; além disso, suporta mais efeito TRIP durante a deformação. No entanto, a complexa evolução da microestrutura durante a partição e os mecanismos detalhados não são totalmente revelados, pelo que muitas das evoluções de Q&P ainda são uma questão de debate. Por exemplo, a formação de bainite durante o particionamento não pode ser completamente excluída pelo que poderá explicar o aumento de carbono medido na austenite retida porque as temperaturas de particionamento são iguais às da formação da bainite. Embora os mecanismos detalhados não sejam totalmente explicados, os benefícios do tratamento Q&P são claramente demonstrados pelas propriedades mecânicas aprimoradas. A gama de tensão que pode ser alcançado com este novo processo está entre 1000 e 1500 MPa, com um alongamento total de 20%. Além disso, como a matriz pode ter martensite temperada, a resistência a danos é melhorada em comparação com os aços DP ou TRIP com resistência idêntica níveis [11-12]. Na figura 2.3, está representado esquematicamente, o tratamento de um aço Q&P.

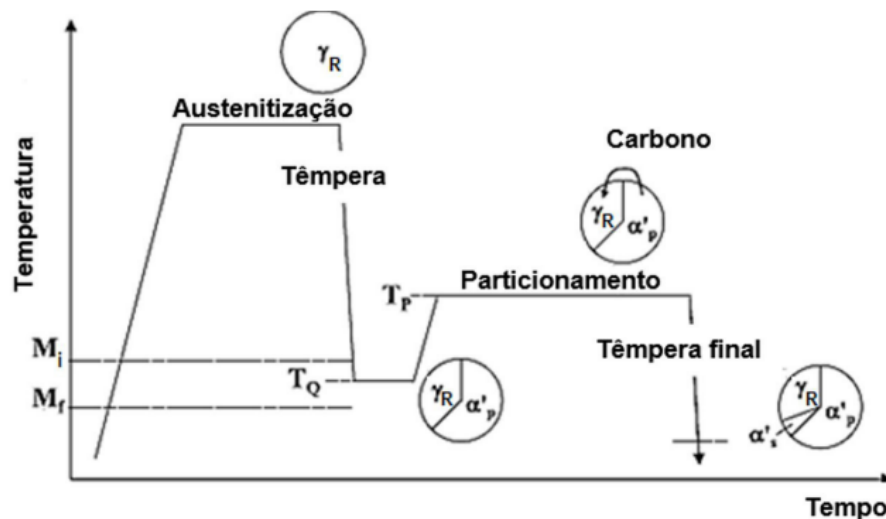


Figura 2.3 - Representação do tratamento térmico efetuado para processamento de aços Q&P (adaptado de [13])

Através de testes mecânicos como ensaios de tração, foi possível construir o gráfico tensão-deformação (Figura 2.4) e, posteriormente, foram calculadas algumas propriedades de um aço Q&P, tais como a tensão limite de elasticidade, σ_e , resistência máxima à tração, $\sigma_{m\acute{a}x}$, deformação uniforme, ϵ_u , alongamento total, ϵ_{tot} , coeficiente de anisotropia, r , e coeficiente de encruamento, n (Tabela 2.1).

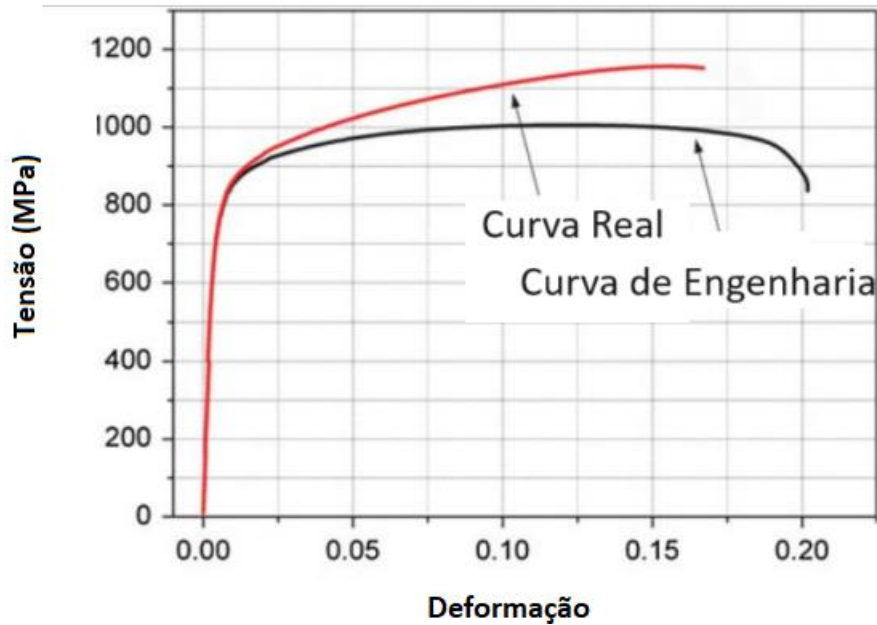


Figura 2.4 – Gráfico tensão-deformação real e de engenharia típicos de um aço Q&P (imagem adaptada de [11])

Tabela 2.1 – Propriedades de um aço Q&P [11]

Material	Espessura(mm)	σ_e (MPa)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	ϵ_u (%)	ϵ_{tot} (%)	r	n
QP980	1,2	689	1054	23,41	17,26	0,758	0,179

2.4 Aços TBF assistidos por TRIP

Os aços bainítico-ferríticos (TBF) assistidos por TRIP podem ser considerados como uma etapa adicional de desenvolvimento significativo entre os AHSS de 3ª geração. Sua microestrutura contém uma matriz bainítico-ferrítica com partículas de austenita retidas. As composições químicas típicas dos aços TBF contêm carbono, silício e manganês como principais elementos de liga. As modificações de liga incluem variações do teor de nióbio e crômio. A formação de cementite durante a transformação bainítica é suprimida pelo silício. O Si adicionado aumenta o teor de carbono na austenite retida e estabiliza a austenite [12,14]. Na figura 2.5, está representado esquematicamente, o processamento de um aço TBF assistido por TRIP.

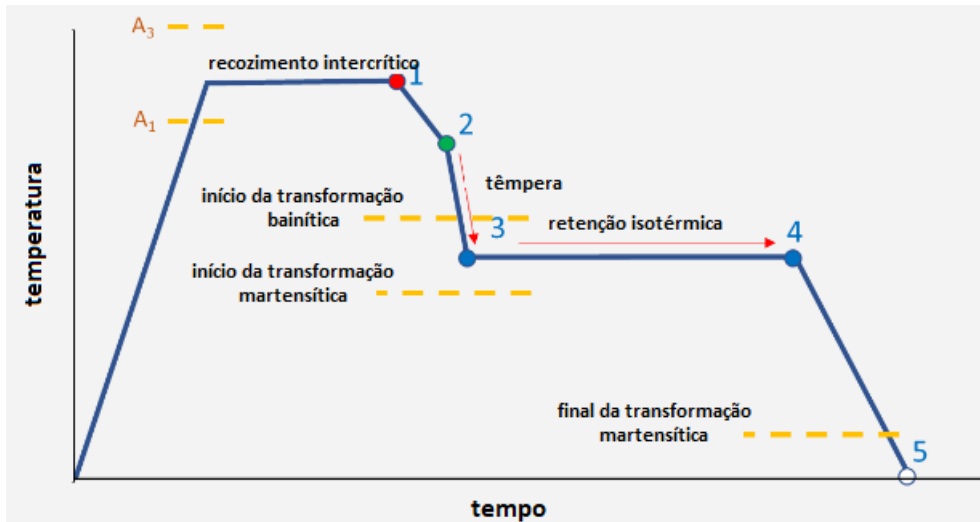


Figura 2.5 – Representação do tratamento térmico efetuado para processamento de aços TBF assistidos por TRIP (imagem adaptada de [14])

Tal como no caso anterior, foram feitos gráficos tensão-deformação em aços TBF (Figura 2.6) de modo a encontrar algumas das suas propriedades (Tabela 2.2).

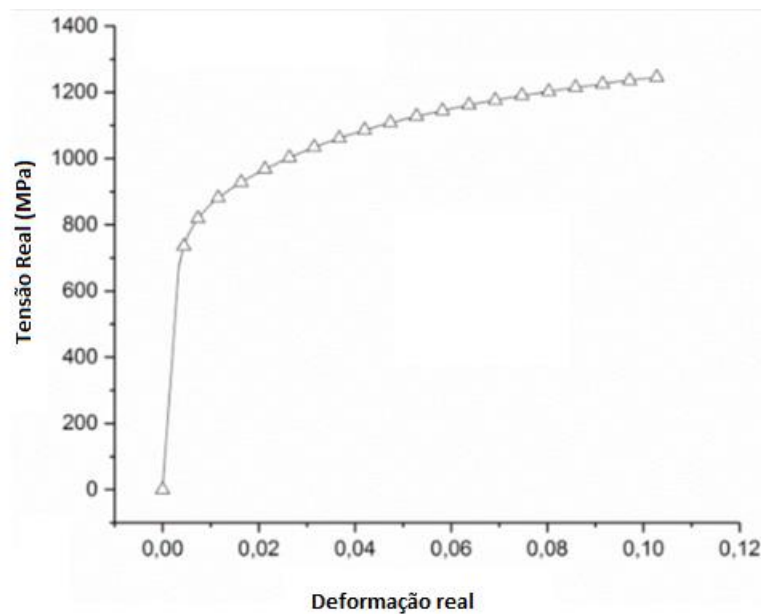


Figura 2.6 – Gráfico tensão-deformação de um aço TBF assistido por TRIP (imagem adaptada de [14])

Tabela 2.2 – Propriedades de um aço TBF assistido por TRIP [11]

Material	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	ϵ_{tot} (%)
TBF14701059	1495	11

2.5 Apresentação do aço estudado

O aço em estudo denomina-se CR980XG3. O aço CR980XG3, lançado em 2018, é classificado como um aço avançado de alta resistência de terceira geração, desenvolvido para oferecer uma combinação de alta resistência e ductilidade. O objetivo principal por trás do seu desenvolvimento foi atender às necessidades da indústria de processamento e do setor automóvel em termos de segurança. Esse novo material foi projetado para apresentar propriedades que permitam que o seu processamento seja eficiente em ambientes industriais e ao mesmo tempo oferecer resistência mecânica e capacidade de deformação plástica, o que é essencial para garantir a segurança dos veículos [15].

Relativamente às propriedades mecânicas deste material, através de pesquisa bibliográfica, foi possível recolher alguma informação relativamente às suas propriedades mecânicas (Tabela 2.3). Mais à frente, no Anexo A, pode-se visualizar os folhetos com estas informações. De seguida apresentam-se algumas figuras comparativas entre o aço estudado e aços DP (Figuras 2.7 e 2.8).



Figura 2.7 – Comparação entre o aço CR980XG3 e aços Dual-Phase em termos de conformabilidade e resistência (adaptada de [15])

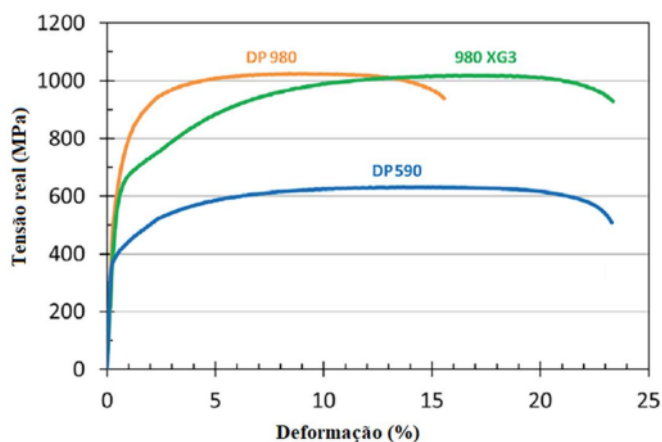


Figura 2.8 – Gráficos tensão-deformação real para o aço em estudo e para aços DP (adaptada de [15])

Tabela 2.3 – Algumas propriedades do aço em estudo [15]

Material	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de rotura (MPa)	Alongamento total (%)
CR980XG3	640	1020	23

2.6 Influências da alteração da trajetória de deformação

Durante a deformação plástica, um material pode enfrentar diferentes tipos de solicitações, como tração, compressão, torção, entre outros, o que muda a sua trajetória de deformação. Devido a estas mudanças na forma como o material é carregado, por exemplo, as propriedades como o encruamento podem variar. Dado que este aspeto é crucial para avaliar várias características de deformação de um material, analisar como ele reage a mudanças na trajetória de deformação é essencial para escolher o material mais adequado para um uso específico. Posto isto, a alteração da trajetória de deformação irá influenciar algumas propriedades apresentadas a seguir [16-17].

2.6.1 Tensão de recarga

A mudança na trajetória de deformação durante a deformação plástica origina 3 tipos de efeitos na curva de tensão-deformação. Estes efeitos podem ser visualizados na figura 2.9, no momento de transição entre a zona elástica e plástica.

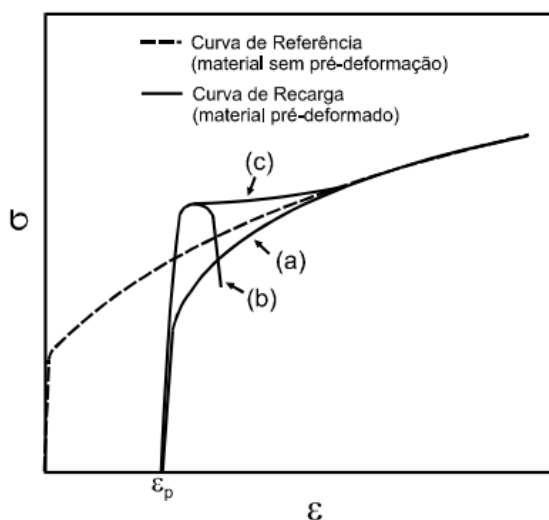


Figura 2.9 – Curvas tensão-deformação tipicamente obtidas em ensaios de tração uniaxial de materiais pré-deformados. (ϵ_p – Valor da pré-deformação) [17]

A curva (a) exibe uma tensão limite de elasticidade mais baixa em comparação com a curva do material que não sofreu pré-deformação. Esta característica é acompanhada por um encruamento mais elevado, algo comum em materiais submetidos a testes que invertem a direção da deformação. Esta inversão na direção de deformação, é um fenómeno conhecido por efeito de Bauschinger.

As curvas (b) e (c) ilustram situações onde a tensão limite de elasticidade durante a recarga é superior à do material padrão que não foi pré-deformado. Como resultado, o encruamento destas curvas é inferior ao da curva padrão. Na curva (c), o material tem uma tensão máxima parecida com a da curva padrão. Contudo, a curva (b) mostra um material que apresenta quebra na fase inicial de recarga, levando a uma rotura antecipada.

As alterações resultantes do encruamento do material influenciam características como a ductilidade, que é representada pela deformação uniforme e deformação total. Esta pode ser avaliada através de ensaios de tração e em determinadas situações, pode haver um retardamento no começo da instabilidade plástica ou uma restrição na deformação uniforme, o que se torna um obstáculo na conformação do material [16-17].

2.6.2 Pré-deformação

Para uma determinada mudança na trajetória de deformação, todos os materiais metálicos têm um ponto crítico de pré-deformação onde a partir do qual, a capacidade do material para sofrer deformação plástica reduz-se de forma acentuada. Esse efeito pode ser observado na figura 2.10 para forças de tração. Como se pode ver na imagem, no caso dos aços macios, o valor crítico é aproximadamente 0,1 (pré-deformação de 10%) [17].

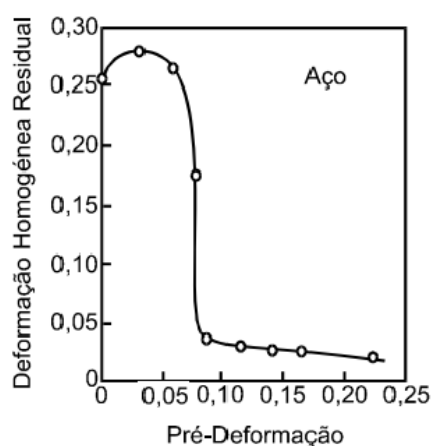


Figura 2.10 - Efeito do valor de pré-deformação no valor da deformação plástica homogénea residual no aço macio deformado segundo trajetórias ortogonais de tração-tração [17]

2.6.3 Amplitude da alteração da trajetória de deformação

A amplitude da alteração da trajetória de deformação é um critério essencial ao avaliar a capacidade de conformação de metais durante mudanças consecutivas nas direções de deformação. Este critério é determinado pelo cálculo do produto interno dos tensores de deformação aplicados durante a deformação inicial e a subsequente, conforme descrito na equação 2.1.

$$\alpha = \frac{d\varepsilon_p \cdot d\varepsilon}{\|d\varepsilon_p\| \|d\varepsilon\|} = \frac{d\varepsilon_p : d\varepsilon}{\sqrt{d\varepsilon_p : d\varepsilon_p} \sqrt{d\varepsilon : d\varepsilon}}$$

(Eq. 2.1)

em que $d\varepsilon_p$ e $d\varepsilon$ representam, na forma vetorial, os tensores de deformação plástica durante a pré-deformação e a deformação seguinte, respetivamente. O valor de α está relacionado com o nível de atividade dos sistemas de escorregamento em função da mudança de trajetória de deformação. Por definição, este parâmetro varia entre 1 (situação em que não existe alteração da trajetória de deformação) e -1 (situação em que o sentido de aplicação da carga é invertido, como é o caso dos testes Bauschinger). Analisando a Figura 2.11, é possível verificar os valores do parâmetro α para cada ângulo de recarga numa sequência de tração-tração. Para um ângulo 90° é possível confirmar o efeito de Bauschinger, dado que para uma recarga no sentido transversal ao do primeiro carregamento, o valor de α é negativo [16-17].

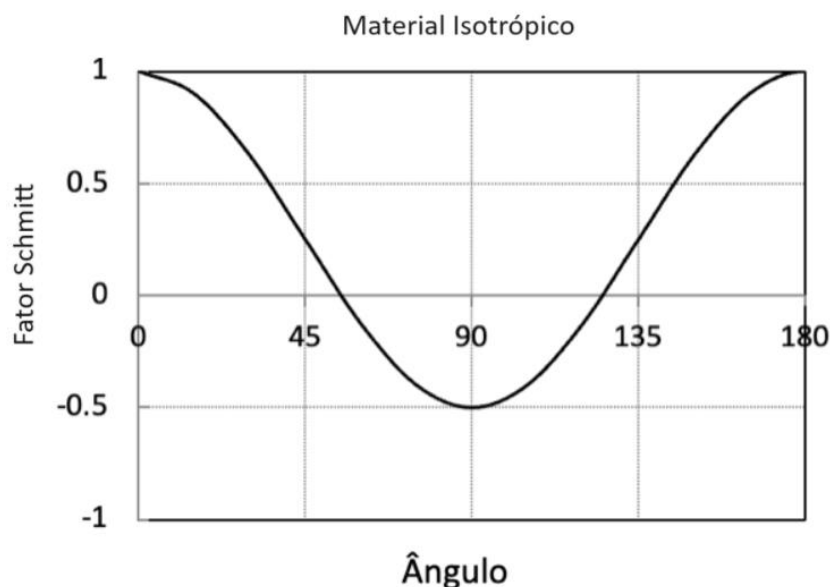


Figura 2.11 – Valor de α para ensaios sequenciais de tração uniaxial em função do ângulo da orientação em relação à direção de laminagem num material isotrópico

2.7 Ensaio de tração

Um ensaio de tração é um teste mecânico utilizado para avaliar as propriedades de um material. É um procedimento padrão aplicado em diversos setores da engenharia, como metalurgia, construção civil, indústria automotiva e aeroespacial.

Nesse ensaio, um provete, que geralmente possui formato retangular ou cilíndrico, é submetido a uma força de tração gradualmente crescente até que ocorra a sua ruptura. Durante o ensaio, são medidos diversos parâmetros, como carga aplicada e deformação do material, a fim de avaliar o seu comportamento mecânico.

O ensaio de tração é realizado em uma máquina de ensaio universal, semelhante à da representação esquemática da figura 2.12, que consiste em dois dispositivos de fixação nos quais o provete é montado. Um dos dispositivos é fixo, enquanto o outro é móvel e se move a uma taxa de deformação controlada. À medida que a força é aplicada, o material sofre uma deformação elástica, seguida de uma deformação plástica, e, eventualmente, a ruptura. [18]

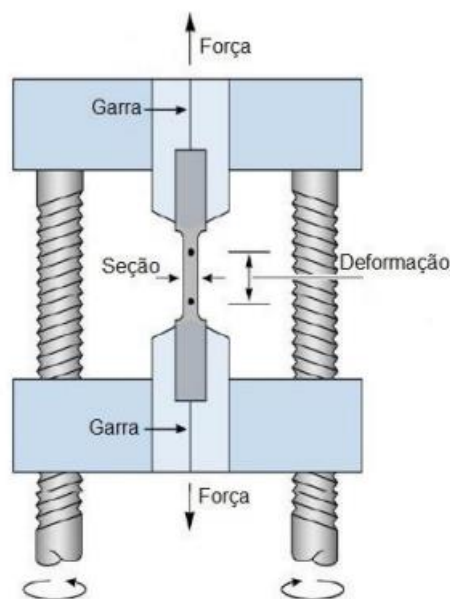


Figura 2.12 - Representação esquemática de um ensaio de tração (adaptada de [19])

Com base nos valores de tensão e deformação obtidos, é possível construir uma curva de tensão-deformação, que representa o comportamento do material durante o ensaio (Figura 2.13). Fazendo o tratamento de dados da curva, é possível obter informações importantes, como tensão limite de elasticidade, resistência à tração, deformação máxima, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, entre outras características importantes dos materiais.

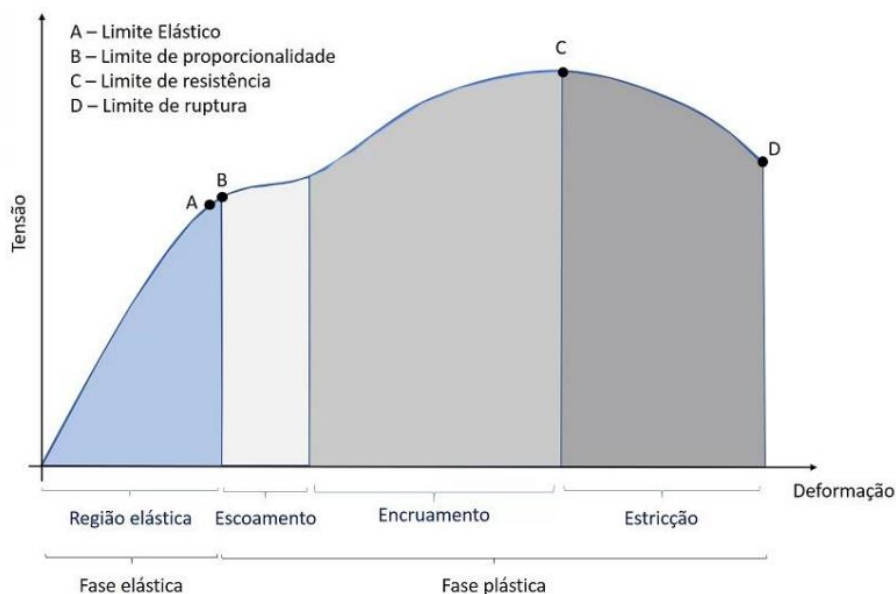


Figura 2.13 - Gráfico comum de tensão-deformação de um aço submetido a um ensaio de tração (adaptada de [18])

O declive da reta entre o ponto da origem do gráfico e o ponto A, representa o módulo de elasticidade do material ou módulo de Young, E . O limite elástico de um material ocorre no ponto B, correspondendo-lhe a denominada tensão limite de elasticidade, σ_e , também conhecida por tensão de cedência. Neste ponto finaliza-se a deformação elástica, na qual o provete retorna ao comprimento inicial depois de deformado, e inicia-se a deformação plástica, em que a deformação sofrida é permanente. A leitura de σ_e é difícil e, por isso, definiu-se como convenção a tensão limite de elasticidade a 0,2% de deformação como valor a utilizar em cálculos de engenharia. As deformações que ocorrem no provete durante os ensaios são uniformes, até se atingir o ponto de tensão máxima (ponto C). Após ser atingido esse ponto de carga máxima, o material entra em estricção, em que a tensão vai diminuindo até ocorrer a rotura do provete [18,20,21].

2.8 Propriedades mecânicas

Num ensaio de tração, quando é aplicada uma força, F , num provete com o formato apresentado na figura 2.14, ocorre uma deformação axial, que aumenta o comprimento inicial, l_0 , para um comprimento final, l , e, simultaneamente, a largura e a espessura diminuem [18,21].

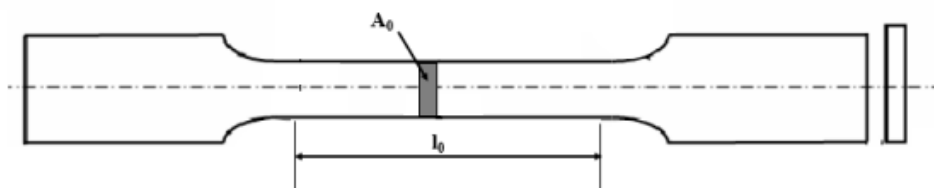


Figura 2.14 - Formato de um provete retangular para ensaio de tração uniaxial (adaptada de [22])

A curva tensão-deformação pode ser dividida em várias regiões, como vimos anteriormente na Figura 2.13. A uniformidade nas deformações ao longo do provete termina no momento em que é atingida a força máxima suportada pelo material, começando a aparecer a estrição e a consequente diminuição localizada da secção transversal do provete, zona onde ocorrerá a rotura do provete. Após o ponto de força máxima dá-se uma diminuição contínua da tensão calculada, embora, na realidade, a tensão efetiva não diminua. De facto, esta aparente queda de tensão é devida ao método de cálculo que considera a secção do provete um valor constante ao longo do ensaio. Consequentemente os resultados do ensaio de tração podem ser apresentados com as tensões e deformações anteriores, denominadas de engenharia ou, de outra forma, em verdadeiras ou reais. A tensão verdadeira ou real, σ_v , é definida como a razão entre a força aplicada, F , e a área da secção instantânea, A , sobre a qual a deformação está a ocorrer, de acordo com a equação 2.2 [18,21,23].

$$\sigma_v = \frac{F}{A} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Avaliando a variação de A em cada instante, é possível caracterizar de forma mais precisa a região plástica do material. Nesse caso, a tensão aumenta continuamente até à rotura. Por definição, a variação infinitesimal da deformação é calculada como a razão entre a variação infinitesimal do comprimento e o comprimento instantâneo do provete (equação 2.3). Em outras palavras, é obtida uma medida extremamente pequena da deformação ao dividir a mudança impercetível no comprimento pelo comprimento atual do provete [21, 23, 24].

$$d\varepsilon_v = \frac{dl}{l} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Integrando a equação 2.3, entre o comprimento inicial, l_0 , e instantâneo, l , obtém-se a deformação real, ε_v , na equação 2.4.

$$\varepsilon_v = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Considerando que o volume do material se mantém constante na zona plástica, ou seja,

$$A \cdot l = A_0 \cdot l_0 = \text{constante} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Podemos definir a deformação real como:

$$\varepsilon_v = \ln \frac{A_0}{A} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Ainda que a equação 2.6 só seja válida para a zona plástica, é comum ser também utilizada na zona elástica devido ao facto de que nos aços, a deformação elástica é muito pequena pelo que o erro não é significativo.

A deformação verdadeira pode ser determinada com a deformação de engenharia:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l - l_0}{l} = \frac{l}{l_0} - 1$$

$$\text{ou} \quad \frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon$$

(Eq. 2.7)

Substituindo na fórmula da deformação verdadeira ficamos com:

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon)$$

(Eq. 2.8)

De igual forma, podemos calcular a tensão verdadeira a partir da tensão de engenharia. Usando a equação 2.7 e 2.8, temos:

$$\frac{1}{A} = \frac{l}{l_0 A_0} = \frac{1 + \varepsilon}{A_0}$$

(Eq. 2.9)

Ao substituir na equação da tensão verdadeira temos:

$$\sigma_v = F \frac{1 + \varepsilon}{A_0} = \sigma(1 + \varepsilon)$$

(Eq. 2.10)

2.9 Encruamento

O expoente de encruamento, n , é importante no sentido de avaliar a resistência do aço a ser deformado plasticamente e pode ser calculado através da equação de Hollomon:

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

(Eq. 2.11)

Em que K é o valor da constante plástica de resistência, tendo sido calculado um valor médio deste durante o intervalo de deformação utilizado para o cálculo de n .

O expoente de encruamento, n , pode ser calculado a partir do gráfico do logaritmo da tensão verdadeira e logaritmo da deformação verdadeira como se pode ver na figura 2.15. Como esta propriedade mecânica está relacionada com o comportamento plástico do material, o intervalo escolhido para calcular o encruamento foi o que está entre o ponto de tensão limite de elasticidade (ponto onde acaba a deformação elástica e se inicia a deformação plástica), e o ponto de força máxima [24].

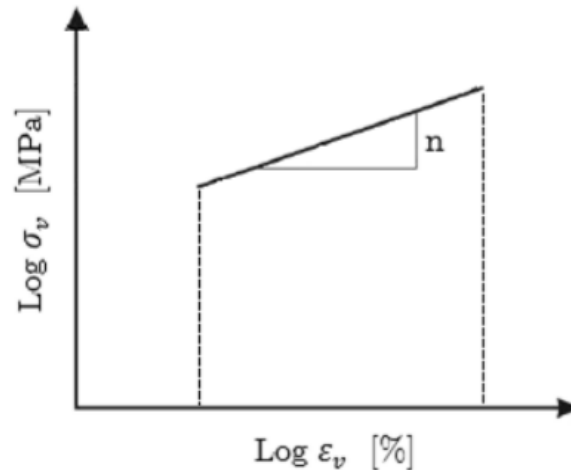


Figura 2.15 – Gráfico dos logaritmos da tensão e deformação verdadeira para achar o coeficiente de encruamento (adaptado de [16])

2.10 Anisotropia

Existe uma grande variedade de materiais metálicos utilizados em engenharia, cujas propriedades mecânicas variam em função da direção de sollicitação considerada. Este fenómeno denomina-se por anisotropia que se deve à estrutura cristalográfica e depende do teor em elementos de liga e à natureza dos tratamentos térmicos e mecânicos a que o material foi previamente submetido.

As chapas exibem fundamentalmente duas formas de anisotropia: anisotropia planar e anisotropia normal. A anisotropia planar ocorre quando as propriedades mecânicas da chapa variam dependendo da direção em que são avaliadas no plano. Por outro lado, a anisotropia normal surge quando as propriedades ao longo da espessura diferem das observadas no plano da chapa. Para caracterizar o grau de anisotropia de um determinado material, é necessário realizar testes de tração uniaxial, nos quais amostras são obtidas em várias direções no plano da chapa (figura 2.16). Assim, é preciso realizar testes em três direções distintas: direção da laminagem, direção perpendicular à da laminação e a 45° em relação à direção da laminagem [25-26].

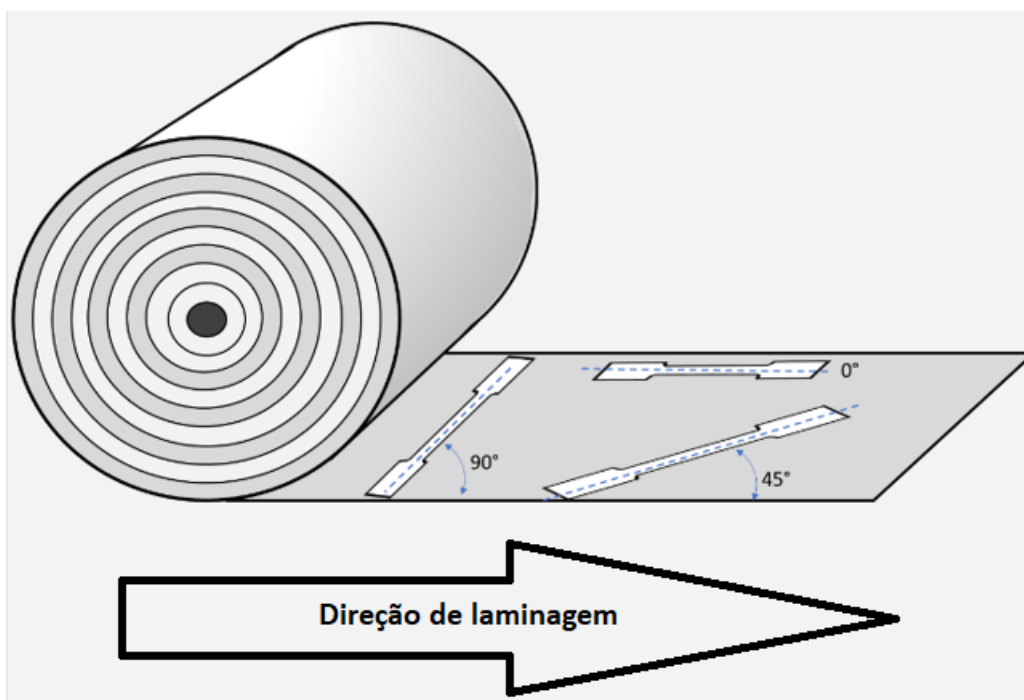


Figura 2.16 – Exemplos de provetes em diferentes direções em relação à direção de laminagem numa chapa de aço (adaptado de [27])

A avaliação da anisotropia das chapas, quando deformadas plasticamente, é feita através do cálculo do coeficiente de anisotropia, também conhecido como coeficiente de Lankford. Esse coeficiente é determinado comparando as deformações reais que ocorrem na largura, ε_w , e na espessura, ε_t , da chapa durante uma faixa predefinida de deformação. Para obter esse coeficiente, são realizados testes de tração uniaxial em amostras retiradas em diferentes direções do plano da chapa, neste caso específico a 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminagem [25,26,28].

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{t}{t_0}}$$

(Eq. 2.12)

Em que w_0 e t_0 , representam a largura e espessura inicial do provete ensaiado, e, w e t , representam a largura e espessura final, respetivamente. Como a espessura é um parâmetro de difícil medição, é normal considerar o volume constante durante ensaio, e sabendo o comprimento e largura para cada instante através do registo do extensómetro temos que:

$$\varepsilon_l + \varepsilon_w + \varepsilon_t = 0,$$

$$\varepsilon_t = -(\varepsilon_l + \varepsilon_w)$$

(Eq. 2.13)

Desta forma podemos definir r , como

$$r = \frac{\varepsilon_w}{-(\varepsilon_l + \varepsilon_w)} = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{l_0 \cdot w_0}{l \cdot w}}$$

(Eq. 2.14)

Posto isto, um material é considerado isotrópico, se o coeficiente de Lankford for igual a 1. Caso o valor do coeficiente de anisotropia seja elevado, significa que o material apresenta uma elevada resistência à deformação ao longo da sua espessura, ou seja, irá ter maior deformação segundo a largura.

A partir do coeficiente de anisotropia para cada direção do plano da chapa em relação à orientação de laminagem, é possível calcular outros dois parâmetros: a anisotropia normal e a anisotropia planar [25,28,29].

A anisotropia normal, r_m , define a capacidade do metal de se deformar na direção da espessura em relação à deformação no plano da chapa.

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$$

(Eq. 2.15)

Se a anisotropia normal é maior que 1, significa que no ensaio de tração a deformação na largura é maior que a deformação na espessura. É desejável que a anisotropia normal seja o mais elevada possível, para permitir maior fiabilidade em processos de estampagem.

A anisotropia planar, Δr , é por outro lado, um indicador de “orelhamento” de um material, cuja equação está representada na equação 2.16.

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2}$$

(Eq. 2.16)

É desejável que o valor da anisotropia planar seja o mais próximo de 0 possível, de modo a evitar o aparecimento de “orelhas” no material (figura 2.17). Portanto a anisotropia planar,

indica a diferença de comportamento que o material pode apresentar no plano da chapa em função das diferentes direções consideradas.



Figura 2.17 - Exemplo de “orelhamento” de um material devido à sua anisotropia planar (adaptado de [30])

Na tabela 2.4, estão alguns intervalos de valores típicos de anisotropia normal para determinados materiais.

Tabela 2.4 - Anisotropia normal de alguns materiais ([31])

Material	r_m
Ligas de zinco	0,4-0,6
Aço laminado a quente	0,8-1,0
Aço acalmado com alumínio	1,4-1,8
Ligas de alumínio	0,6-0,8
Ligas de titânio	3,0-5,0
Cobre e latão	0,6-0,9
Aços inoxidáveis	0,9-1,2
Aços de alta resistência e de baixa liga	0,9-1,2

2.11 Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson, ν , é um valor que define a quantidade de contração que ocorre quando um objeto é tracionado ou a quantidade de expansão quando é comprimido. A contração é sempre medida a 90 graus da força de tração ou compressão. O coeficiente de Poisson mede a rigidez do material na direção perpendicular àquela em que a carga é aplicada. Em termos muito simples, em geral, quando um material é tracionado, tende a ficar mais fino, e quando é comprimido, fica mais espesso. Isso é conhecido como o Efeito de Poisson. O valor de ν é determinado pela relação negativa entre a deformação na direção perpendicular, ε_w ou ε_t , e a deformação medida na direção longitudinal, ε_l . Para

materiais isotrópicos, o coeficiente de Poisson é o mesmo nas duas direções (largura e espessura), pelo que:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_l} = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l}$$

(Eq. 2.17)

Os valores geralmente variam entre 0,1 e 0,5 para a maioria dos materiais, sendo que num aço em geral, o coeficiente de Poisson é de aproximadamente 0,3. De notar que este valor se refere apenas à zona elástica, já que na zona plástica, o material sofre deformações permanentes e o comportamento não é mais linear nem reversível. Nesta zona, o conceito de coeficiente de Poisson torna-se menos definido e pode não ser aplicável, pois as deformações não seguem mais a relação linear característica da elasticidade [32].

Capítulo 3 – Descrição do procedimento experimental

A atividade prática começou com a preparação dos provetes para os ensaios de tração. De uma chapa do aço CRX980XG3TM laminada sem pré-deformação com 1,6 mm de espessura, foram cortados 3 retângulos, utilizando a guilhotina. Posteriormente, através de maquinagem CNC, esses retângulos foram maquinados de maneira a obter a geometria indicada na figura 3.2. Os três provetes maquinados, foram testados na máquina de forma a atingirem pré-deformações de 5%, 10% e 15%, através de ensaios de tração.



Figura 3.1 - Guilhotina e máquina utilizada para corte e maquinagem dos provetes

Antes de se efetuarem os ensaios de tração, mediu-se primeiro a largura inicial, w_0 , e a espessura inicial do provete, e_0 , utilizando um paquímetro e um micrómetro, respetivamente. A geometria dos primeiros provetes está representada na figura 3.2.

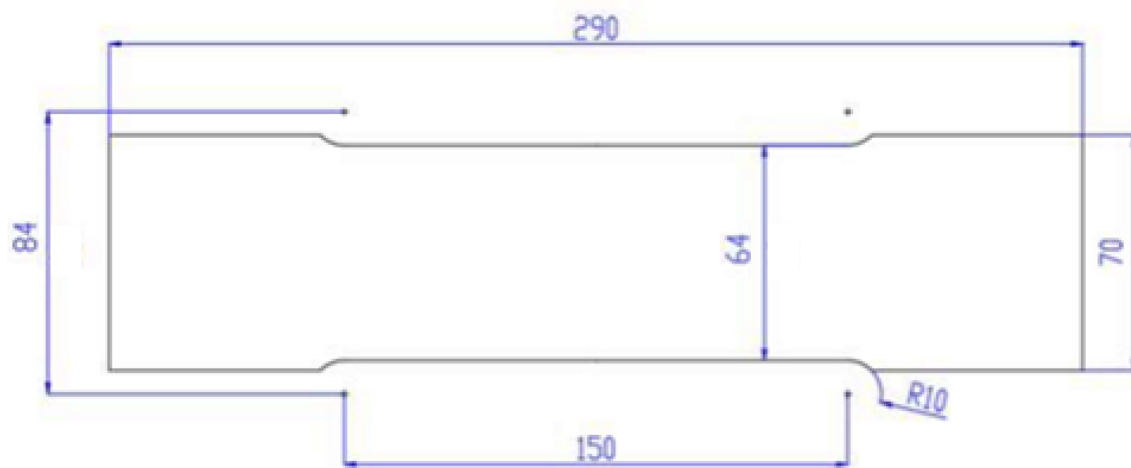


Figura 3.2 - Geometria dos provetes de maiores dimensões

O comprimento inicial, l_0 , foi definido como 110 mm. Note-se que o comprimento inicial, não é o comprimento total do provete, porque a zona das amarras que estão seguras nas

máquinas não irá ser deformada, pelo que se tem de seleccionar uma zona central do provete que irá ser deformada. Essa zona pode ser denominada como zona útil do provete.

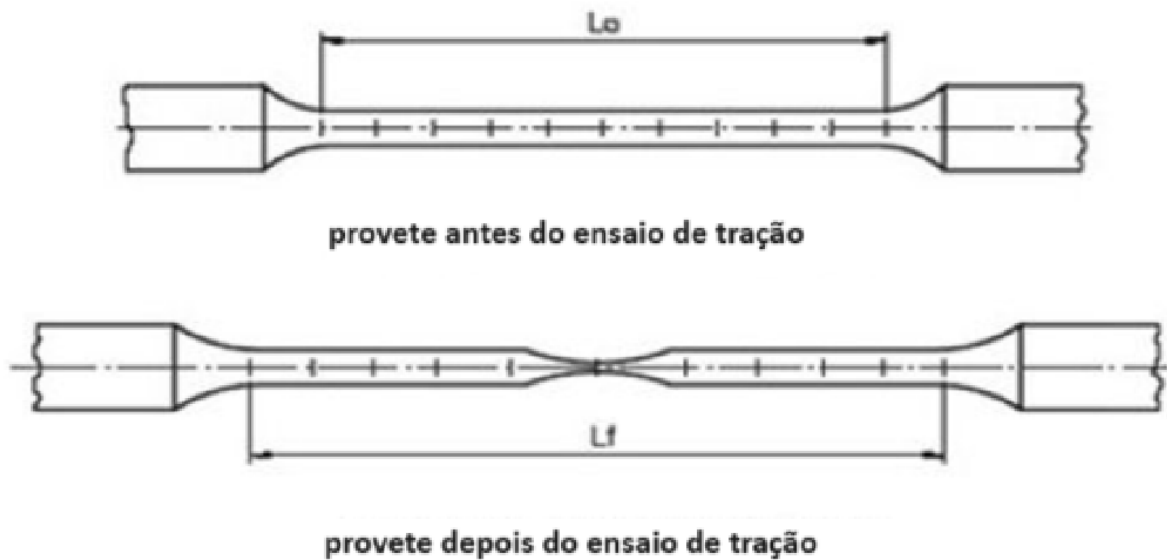


Figura 3.3 - Representação esquemática do comprimento da zona útil de um provete antes e depois do ensaio de tração (adaptada de [33])

Os ensaios de tração destes 3 provetes foram realizados na máquina Shimadzu UH-1000 kN X, na Universidade de Aveiro (figura 3.4). Utilizou-se um vídeo extensómetro independente da máquina de tração em si, de forma a conseguir registar os valores da variação de comprimento para cada instante do ensaio. O ensaio foi realizado com uma velocidade da máquina programada para 9 mm/min que corresponde a uma velocidade de deformação constante, $\dot{\epsilon}$, de $0,001 s^{-1}$, sendo o ensaio controlado até atingir a pré-deformação desejada, e ser interrompido.



Figura 3.4 - Máquina Shimadzu UH-1000 kN X

Antes de se iniciarem os ensaios, foram necessários alguns procedimentos de calibragem e posicionamento do extensômetro. Nesse processo, foi necessário realizar um cálculo sobre a variação que iria ocorrer no comprimento do provete. Para isso, foi desenhada no provete, duas linhas de pontos a 55 mm do centro, que perfazem os 110 mm de comprimento inicial referido anteriormente. Depois de desenhar essas linhas, foram colocadas umas faixas de “diamantes” na zona central das linhas. Estes “diamantes” são usados como pontos de referência que a máquina consegue identificar, e assim registrar a variação de comprimento ao longo do ensaio. O comprimento será dado pela distância entre os centros dos “diamantes” como se pode ver na figura 3.5.



Figura 3.5 - Calibragem através das tiras de "diamantes"

Foi necessário calcular previamente para cada pré-deformação, o comprimento final desejado e a variação de comprimento de modo a saber quando é que o ensaio devia ser interrompido. Para isso utilizou-se a equação da deformação real mencionada anteriormente (Equação 2.4).

Através do computador associado ao extensómetro, podemos ver os valores da força aplicada, do comprimento e largura ao longo do ensaio. Quando o valor apresentado na caixa Ext. 1 (Figura 3.6), que durante os ensaios se apresenta como variação de comprimento, chegasse ao número encontrado nos cálculos efetuados, o ensaio era interrompido manualmente, pelo que as pré-deformações obtidas não são valores exatos.

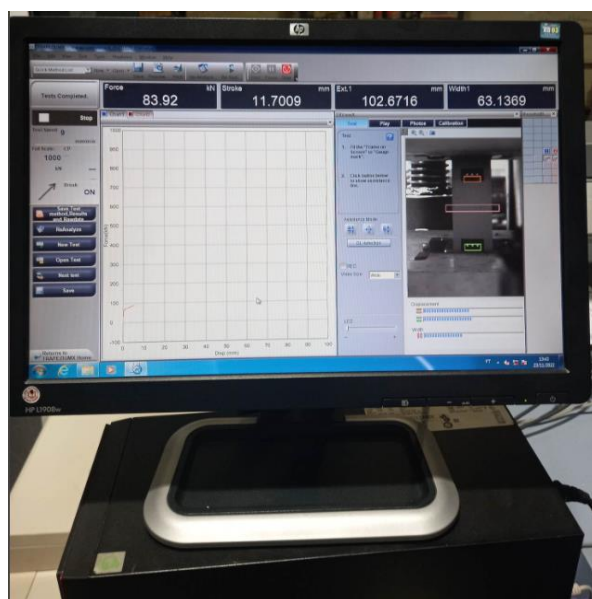


Figura 3.6 - Interface do software Trapezium que comanda a máquina Shimadzu

Por fim, registou-se a espessura final e largura final dos três provetes. Os dados foram retirados da máquina sob forma de ficheiros texto e posteriormente tratados no Excel de forma a que se consiga calcular as deformações e tensões e obter o gráfico tensão-deformação. O objetivo destes primeiros ensaios foi obter três pré-deformações diferentes e posteriormente cortar o material em vários provetes de pequenas dimensões e em diferentes orientações em relação à direção de laminagem. As orientações escolhidas foram 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminagem.

Concluídos estes ensaios, passou-se à próxima etapa dos procedimentos experimentais que foi cortar os provetes deformados em vários provetes de pequenas dimensões com a geometria apresentada na Figura 3.7.

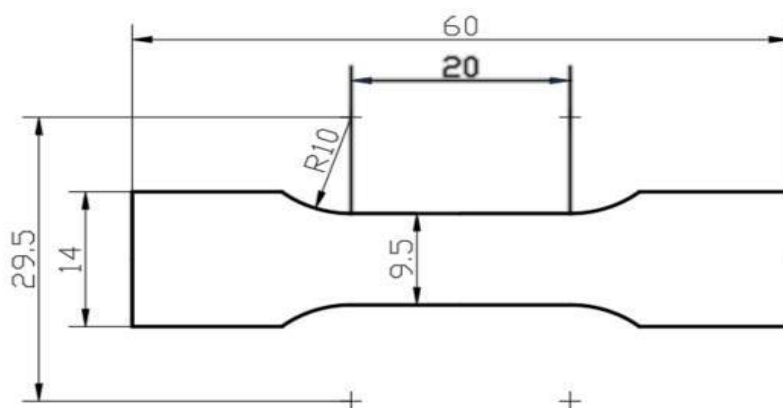


Figura 3.7 - Geometria dos provetes de menores dimensões

No interior da zona deformada, foram desenhados pelos menos três retângulos para cada orientação como se vê na Figura 3.8, sendo a seta azul desenhada na parte direita do provete, um indicador da direção da laminagem.

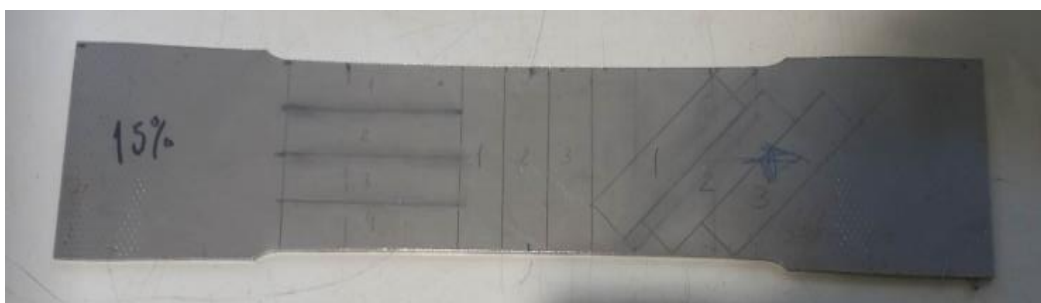


Figura 3.8 - Desenho dos provetes pequenos em diferentes direções de laminagem no provete maior

Após o desenho, cortaram-se os provetes pequenos a partir dos provetes de maiores dimensões (Figura 3.9 da próxima página), utilizando a guilhotina e maquinagem CNC, referidas anteriormente.

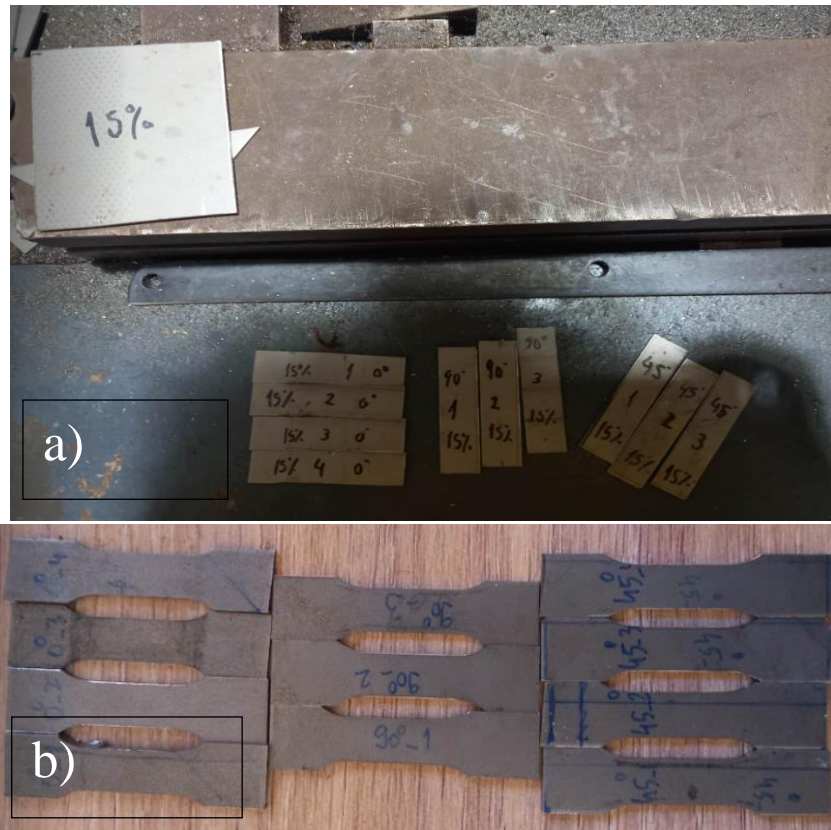


Figura 3.9 – a) Provetes depois de serem cortados na guilhotina; b) Provetes após maquinagem

No ensaio de tração correspondente à segunda trajetória, foram utilizados equipamentos que incluía a máquina Shimadzu AG-X plus, com capacidade de 100 kN, que foi monitorada pelo software TRAPEZIUM X. Esse software registou os valores de força aplicada e deformação do provete. Além disso, foi utilizado o sistema GOM ARAMIS 3D 5M, composto por um laser e duas câmaras de vídeo, que permitiram a realização de medições tridimensionais da posição de pontos nas amostras. Esse sistema é controlado pelo software Aramis, o qual, com base nas imagens gravadas durante os ensaios, realiza o processamento de imagem usando uma técnica chamada correlação de imagem digital. Isso permite calcular as deformações que ocorrem no material durante o ensaio.

Na Figura 3.10, podemos ver todo o equipamento necessário para realizar os ensaios de tração nos provetes pequenos. Um dos computadores está ligado à máquina Shimadzu e o outro ao sistema GOM ARAMIS 3D 5M.

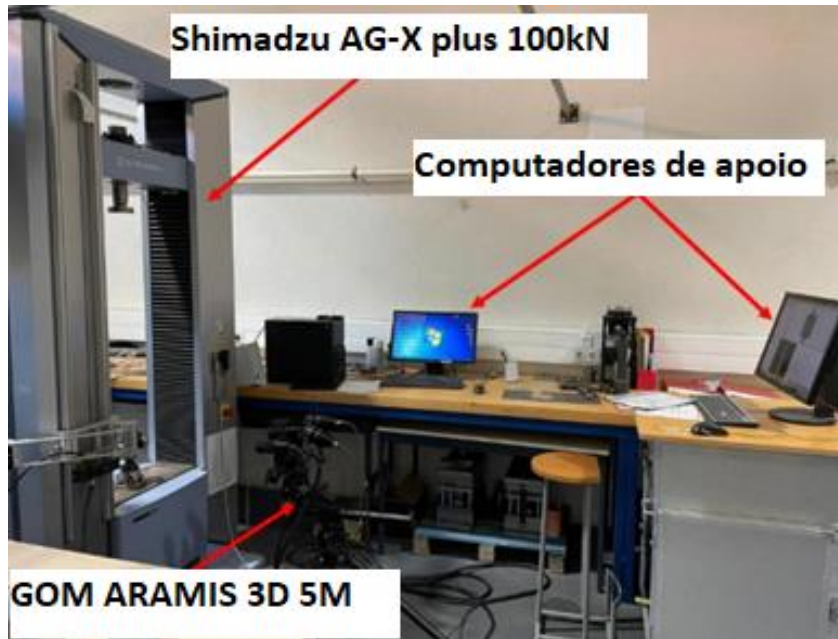


Figura 3.10 - Equipamentos utilizados na atividade experimental

Antes de realizar os testes, foi necessário preparar as amostras, ajustar a intensidade de luz que incide sobre elas e calibrar o sistema Aramis.

Para garantir o funcionamento adequado desse sistema, as amostras a serem testadas precisaram ser previamente pintadas com um padrão semelhante ao mostrado na Figura 3.11. Para fazer isso, as amostras foram inicialmente pintadas com spray branco em apenas um lado. Após a secagem, foi salpicado cuidadosamente spray preto sobre as amostras, a fim de obter o padrão desejado. A Figura 3.12 mostra o aspeto final de um dos provetes pintados.



Figura 3.11 – Padrões de tinta



Figura 3.12 – Provete pintado de acordo com o padrão 65x52mm

O passo seguinte foi posicionar as câmaras de vídeo do sistema GOM ARAMIS 3D 5M no local correto, de modo a visualizar toda a área dos ensaios (Figura 3.13). Começou-se por definir as dimensões da janela de captura da imagem em que, para a lente do sistema que está a ser usada (50mm), as dimensões consideradas ideais seriam $125 \times 100 \text{ mm}^2$, proporcionando um maior campo de visão. Assim, a partir dessas dimensões, definiu-se as dimensões da distância do laser ao provete (485mm) e as distâncias das posições das câmaras (176mm) relativamente à posição do laser a partir da tabela do manual, presente no Anexo B. Este passo foi auxiliado pela imagem captada pelas câmaras e transmitida no monitor do computador.



Figura 3.13 -Equipamento configurado e pronto a ser utilizado

A partir deste ponto todas as etapas seguintes foram auxiliadas pelo software (Figura 3.14). De seguida, focaram-se as duas câmaras para depois se centrar o laser com a mira do software e foram ajustados os projetores de forma a iluminação ser homogênea em ambas as câmaras. Posto isto, ajustou-se a intensidade dos projetores, utilizando o software, alterando-se o “*shutter time*”, que está relacionado com a quantidade de luz, até que fosse possível uma imagem igual nas duas câmaras. Por fim, realizou-se a calibração da GOM ARAMIS 3D 5M com o calibrador (consultar figuras no anexo C), que foi feita com a ajuda do computador que indicava as posições do calibrador para vários ângulos diferentes. Finalizando esta etapa, os equipamentos estavam prontos para a realização dos ensaios de tração.

De seguida, para realizar os ensaios de tração, criou-se um método no programa TRAPEZIUM no computador associado à máquina Shimadzu, para controlar a máquina durante o ensaio. Antes de cada ensaio, inseriu-se a espessura e largura de cada provete, obtida através de medições com paquímetro e micrómetro, e considerou-se 20 mm a faixa de medição. Foram submetidos a ensaios de tração nestas condições, mais de 30 provetes com a geometria indicada na Figura 3.7.

Finalizados os ensaios, passou-se à parte do processamento de dados no TRAPEZIUM que foi uma tarefa simples, porque este programa monitorizou as cargas aplicadas durante o ensaio. No entanto, no ARAMIS, foi necessário processar as imagens obtidas ao longo do ensaio. Através desse processamento de imagem para cada *stage*, foi possível obter os valores de deformação correspondentes. A técnica de pintura dos corpos de prova mencionada no procedimento experimental teve como objetivo viabilizar essa análise. O software do ARAMIS não só monitoriza os ensaios, mas também permite que o utilizador processe as imagens para obter as deformações.

Utilizando um programa de visão computacional, foram calculados os deslocamentos de cada ponto preto pintado em relação ao fundo branco do provete. Com base nesses deslocamentos nos eixos x e y, as deformações nessas direções são calculadas. Além disso, considerando a conservação de volume, também é possível calcular a deformação no eixo z.

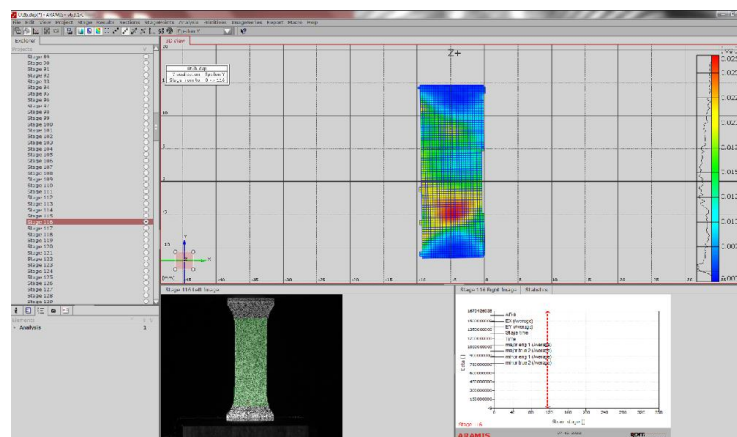


Figura 3.14 - Interface do software ARAMIS

O tratamento de imagem foi feito através dos seguintes passos:

- Definição da área de análise, de modo que esta englobasse todo o provete até à entrada na zona das amarras;
- Adição de um “*Start Point*”. Este ponto foi escolhido numa zona onde houve pouca deformação, ou seja, perto da zona da amarra.
- Cálculo por computador das deformações em todos os pontos da área de análise selecionada, durante todo o ensaio. Em alguns ensaios, a imagem aparecia com alguns “buracos”, que são pontos considerados como informação em falta e que o programa não reconhece. Esses pontos podem ser causados, por exemplo, por problemas na pintura dos provetes. De modo a corrigir este problema, foi feita uma interpolação de forma que esses “buracos” fossem preenchidos. Na figura 3.15, vemos um exemplo de cálculo de deformações de um provete num determinado instante, em que a zona vermelha representa a zona de maior deformação real do provete nesse instante. À direita podemos as cores mais presentes neste instante, através da linha gráfica à beira dos valores de deformação. No Anexo D, é possível visualizar o gradiente de cores da deformação para provetes em diferentes zonas de deformação (zona elástica, plástica, estrição e pré-ruptura).

•

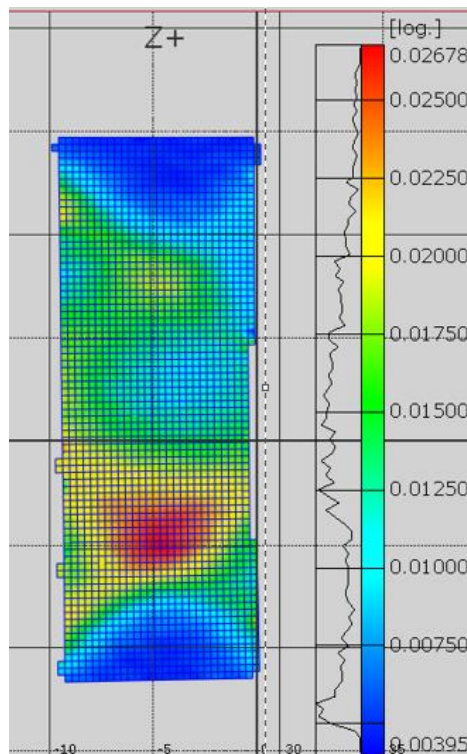


Figura 3.15 - Representação da deformação através do gradiente de cores com escala colorida associada a gráfico que quantifica a presença de cada cor

- Após o programa efetuar os cálculos, foram selecionados e guardados os dados de interesse. Foi nesta fase que se retiraram os valores de deformação para a construção dos gráficos de tensão-deformação. Os valores retirados foram: *Average Major Strain (Technical e Logarithm)*, *Average Minor Strain (Technical e Logarithm)* e o *Stage Time*, (Figura 3.16) que correspondem à deformação de engenharia e real em comprimento e largura do provete e ao tempo de cada *frame*, respetivamente.

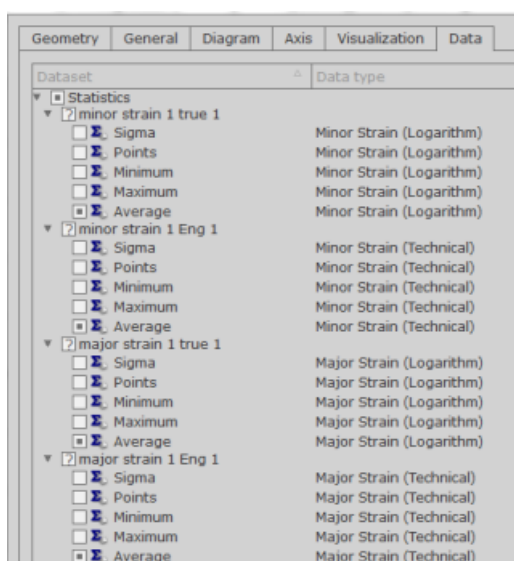


Figura 3.16 – Seleção dos parâmetros desejados, calculados pelo software

- Este procedimento foi repetido em todos os ensaios.

O software da Shimadzu armazena dados de força e deslocamento, enquanto que o Aramis cria *stages*, que são essencialmente *frames* capturados pelas câmaras ao longo do ensaio. Cada estágio possui uma diferença de potencial associada, resultante da interação do software Aramis com a célula de carga da máquina, ou seja, os valores de deformação e tensão tiveram origem em dois dispositivos distintos (um ficheiro do programa TRAPEZIUM e outro do programa ARAMIS). Além disso a Shimadzu AG-X 100kN captava 10 valores de carga por segundo enquanto a GOM ARAMIS 3D 5M captava 1 imagem por segundo, ou seja, 1 valor de deformação por segundo. Consequentemente, foi necessário realizar um cruzamento de dados entre os dois ficheiros de modo a sincronizar o valor de deformação com o valor da carga num instante próximo. Feito esse cruzamento dados, foi possível construir os gráficos tensão-deformação que iremos analisar no capítulo seguinte.

Capítulo 4 - Análise de Resultados

4.1 Gráficos tensão-deformação

Na figura 4.1 estão apresentados os gráficos tensão-deformação dos primeiros ensaios de tração realizados nos provetes de maiores dimensões. São representados os gráficos tensão-deformação reais e de engenharia para deformações de 5%, 10% e 15%, respetivamente. A pré-deformação imposta foi calculada a partir da deformação real, pelo que se mediu o comprimento inicial da zona útil do provete e calculou-se o comprimento final que deveria alcançar em cada uma das pré-deformações para se conseguir a pré-deformação desejada.

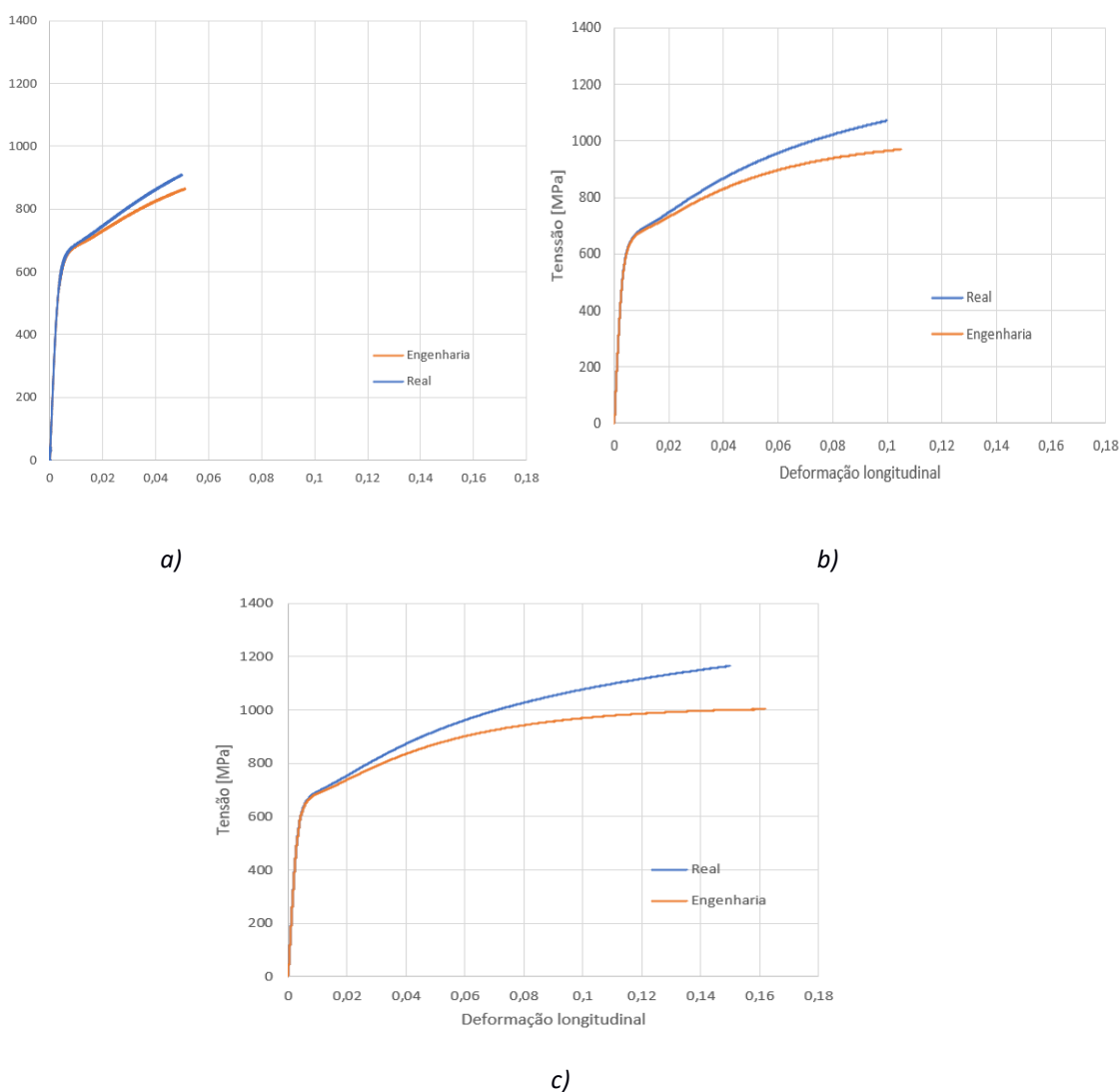


Figura 4.1 – Gráficos tensão-deformação para cada pré-deformação efetuada nos provetes de maiores dimensões. a) Pré-deformação 5%; b) Pré-deformação 10%; c) Pré-deformação 15%

De seguida são apresentados os gráficos de tensão-deformação de engenharia resultantes dos ensaios realizados para os provetes com pré-deformações de 5%, 10%, 15% para cada umas das orientações em relação à direção de laminação (0° , 45° e 90°) e para os provetes sem deformação. Para cada um dos casos em estudo foi realizado, entre 2 a 4 ensaios de tração de maneira a encontrar valores médios plausíveis. Os ensaios foram efetuados a uma velocidade de deformação constante, $\dot{\epsilon}$, de $0,001 \text{ s}^{-1}$ até ao ponto de rotura. Os gráficos tensão-deformação real foram traçados até ao ponto de força máxima e serão apresentados mais à frente no Anexo E. Os gráficos de tensão-deformação de engenharia foram traçados até a um ponto próximo da rotura e estão representados nas figuras seguintes. Note-se que os provetes sem pré-deformação tiveram origem numas tiras de aço à parte, do mesmo material, pelo que não se estudou a orientação em relação à laminação neste caso.

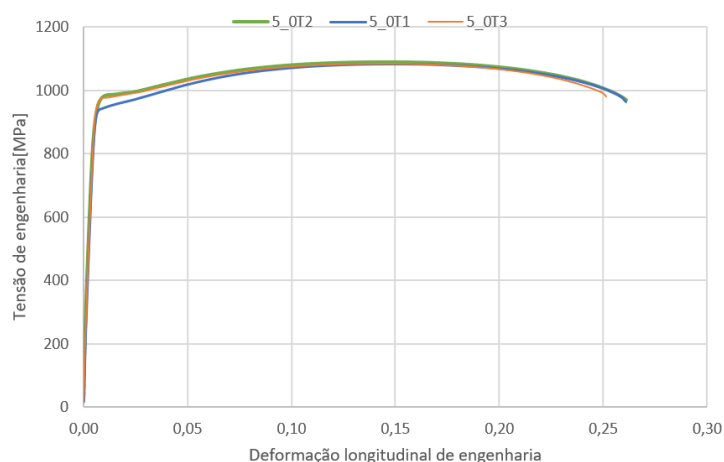


Figura 4.2 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 5% e com orientação de 0° em relação à direção de laminação

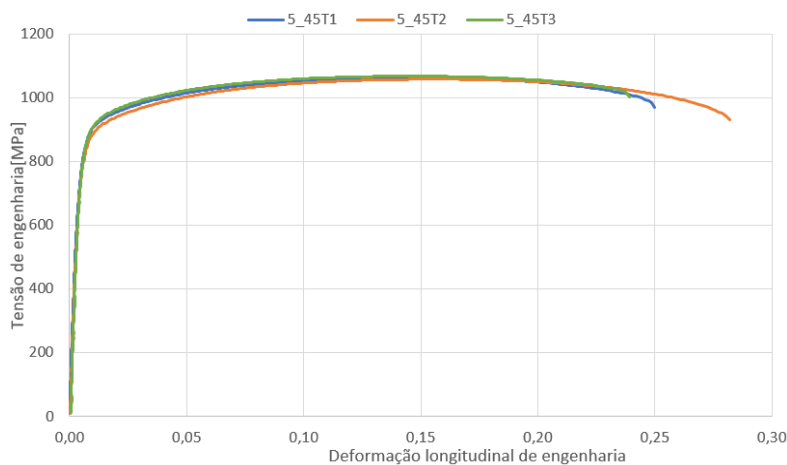


Figura 4.3 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 5% e com orientação de 45° em relação à direção de laminação

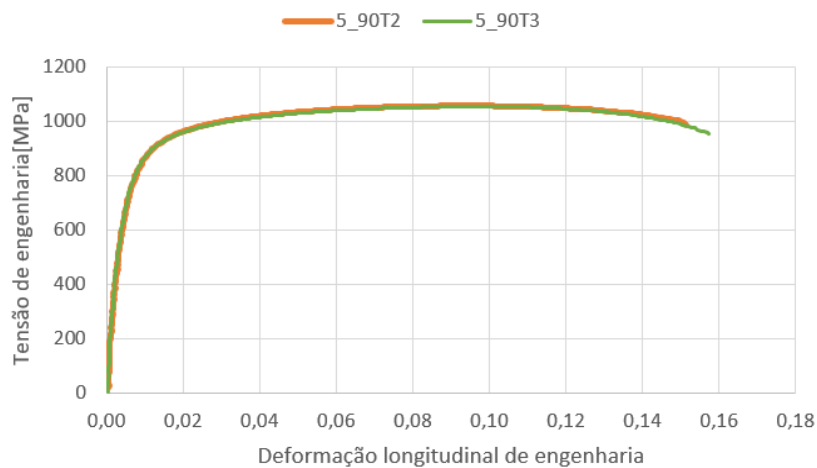


Figura 4.4 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 5% e com orientação de 90° em relação à direção de laminagem

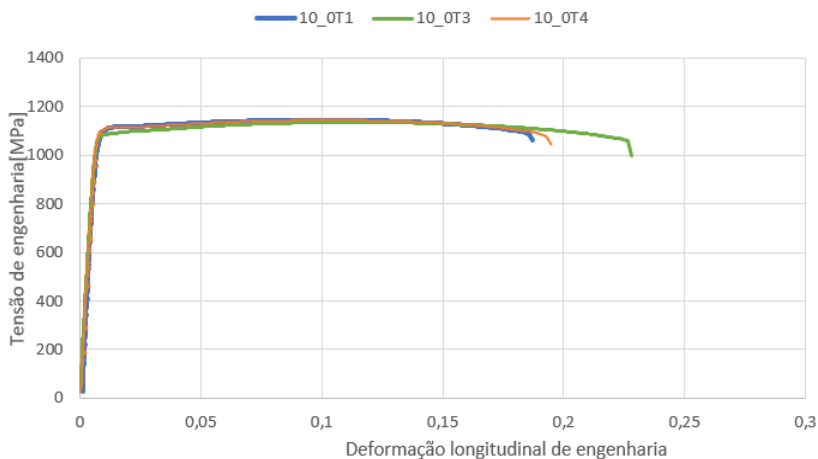


Figura 4.5 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 10% e com orientação de 0° em relação à direção de laminagem

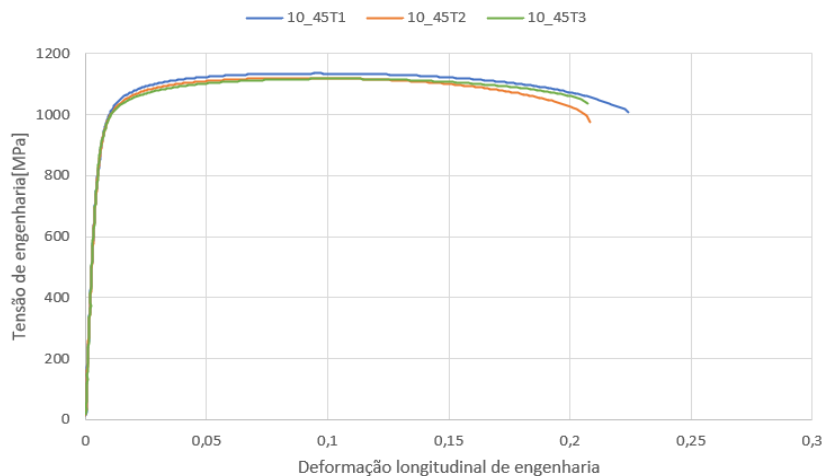


Figura 4.6 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 10% e com orientação de 45° em relação à direção de laminagem

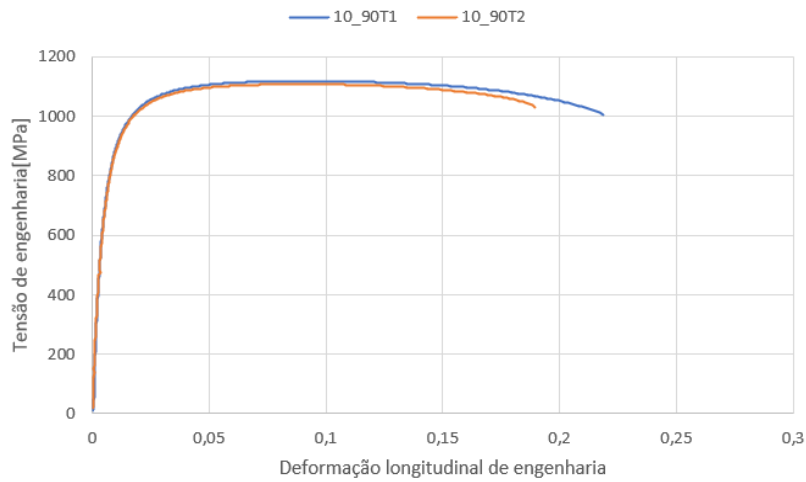


Figura 4.7 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 10% e com orientação de 90° em relação à direção de laminagem

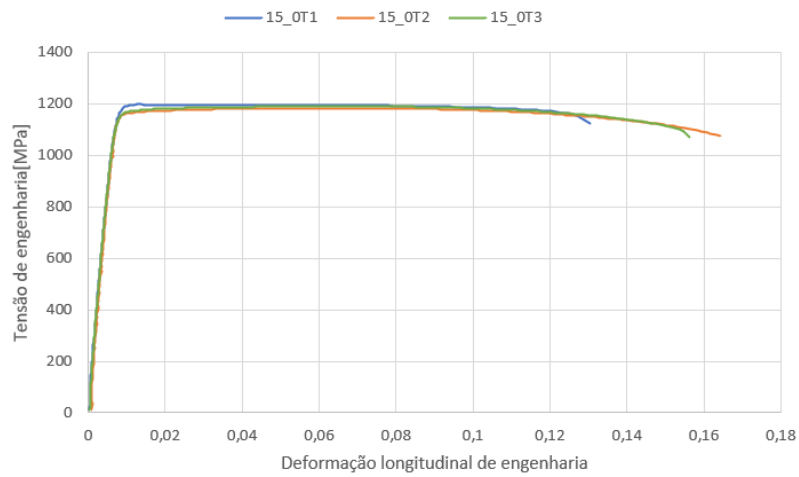


Figura 4.8 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 15% e com orientação de 0° em relação à direção de laminagem

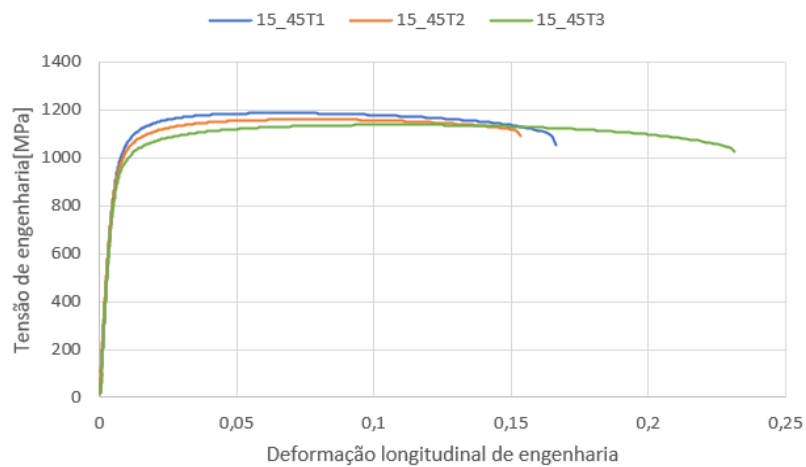


Figura 4.9 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 15% e com orientação de 45° em relação à direção de laminagem

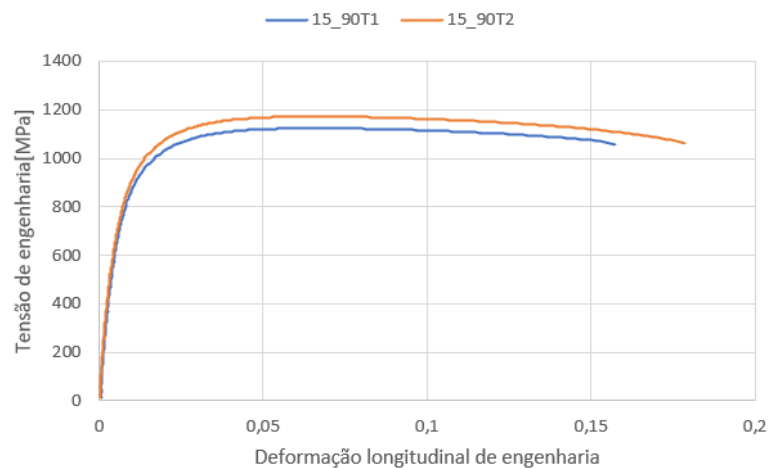


Figura 4.10 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes com pré-deformação de 15% e com orientação de 90° em relação à direção de laminagem

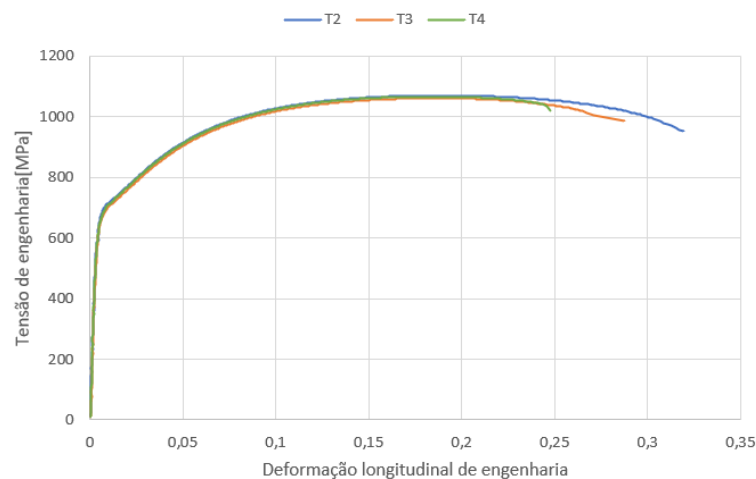


Figura 4.11 - Gráfico tensão-deformação de engenharia para provetes sem pré-deformações

4.2 Propriedades mecânicas

Nas seguintes tabelas, são apresentados os valores médios das propriedades mecânicas calculadas para os provetes com pré-deformações, ensaiados em cada uma das 3 direções estudadas. As primeiras propriedades analisadas foram: a tensão limite de elasticidade, tensão máxima, razão elástica, deformação uniforme, alongamento total e também o módulo de elasticidade.

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas avaliadas para os provetes com pré-deformação de 5% relativamente às três direções em estudo

Pré-deformação de 5%					
Propriedades	σ_e (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_e/σ_{max}	ϵ_u (%)	ϵ_{tot} (%)
Orientação					
0	937,13	1085,15	0,864	14,7	25,84
45	814,28	1062,99	0,766	15,1	26,31
90	727,45	1058,16	0,687	11,1	18,32

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas avaliadas para os provetes com pré-deformação de 10% relativamente às três direções em estudo

Pré-deformação de 10%					
Propriedades	σ_e (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_e/σ_{max}	ϵ_u (%)	ϵ_{tot} (%)
Orientação					
0	1083,25	1143,50	0,947	9,4	20,74
45	912,48	1124,05	0,812	9,6	21,73
90	790,86	1113,28	0,710	8,8	20,70

Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas avaliadas para os provetes com pré-deformação de 15% relativamente às três direções em estudo

Pré-deformação de 15%					
Propriedades	σ_e (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_e/σ_{max}	ϵ_u (%)	ϵ_{tot} (%)
Orientação					
0	1155,26	1190,51	0,960	5,6	16,07
45	952,21	1161,84	0,820	8,4	18,53
90	782,39	1148,10	0,681	6,7	17,90

Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas avaliadas para os provetes sem pré-deformação

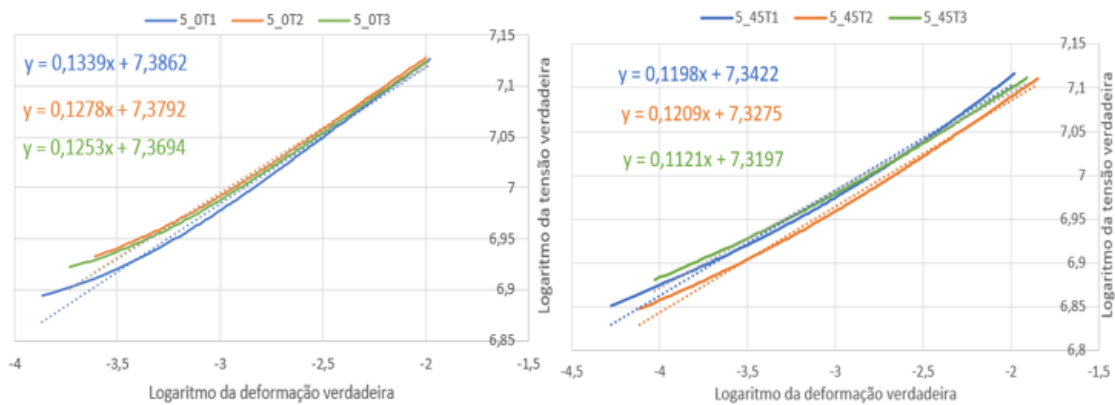
Sem pré-deformação					
Propriedades	σ_e (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_e/σ_{max}	ϵ_u (%)	ϵ_{tot} (%)
	655,69	1066,07	0,615	18,8	28,48

Observando os resultados das tabelas anteriores, podemos ver que nos provetes com orientação de 45° relação à direção de laminagem, obteram-se valores mais elevados de deformação uniforme e deformação total, o que significa que estes provetes apresentam maior ductilidade e que nos provetes de 90° em relação à direção de laminagem, os valores

de tensão limite de elasticidade, σ_e , são menores relativamente às outras direções, o que significa uma maior capacidade encruamento, que irá ser estudado mais à frente. Para encontrar o valor de σ_e , determina-se por convenção, que o ponto de tensão limite de elasticidade encontra-se na zona de 0,2% de deformação. No Anexo G, está apresentado um exemplo de como encontrar σ_e . Verificou-se que à medida que a pré-deformação aumentava, os valores de deformação uniforme e alongamento total iam diminuindo. O valor do módulo de elasticidade, E, calculado foi de aproximadamente 195 GPa e foi semelhante para todas as pré-deformações e orientações. Este foi encontrado a partir do declive entre dois pontos na zona elástica do provete.

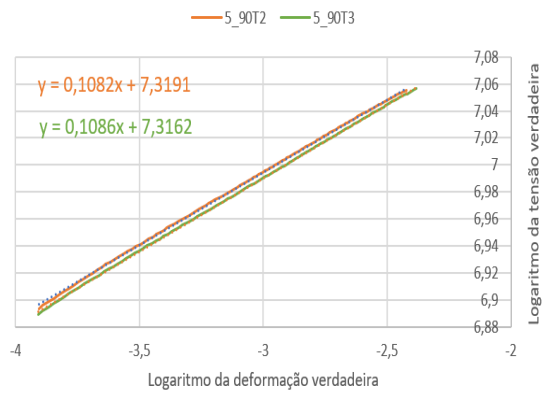
4.3 Encruamento

De seguida são apresentados os gráficos do logaritmo da tensão verdadeira vs logaritmo da deformação (Figura 4.12), dos quais resulta a curva de encruamento de todos os provetes, cujo declive indica o valor do coeficiente de encruamento, n, e está representado a tracejado. De notar que os valores de deformação de engenharia verdadeira são negativos devido ao facto de não estarem representados em percentagem, mas este pormenor não altera em nada as curvas de encruamento nem o valor do seu declive.

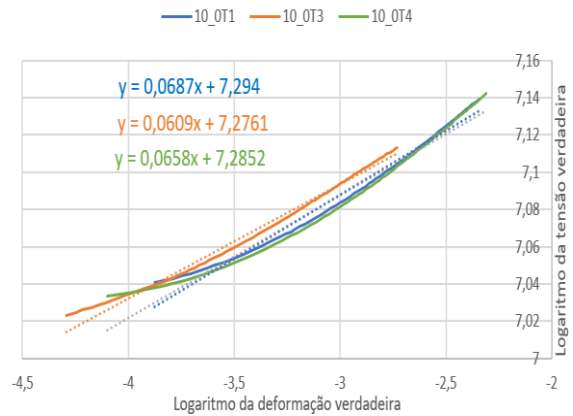


a) Pré-deformação de 5%, 0°

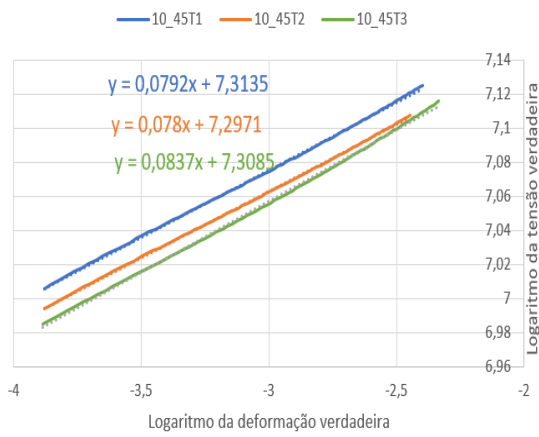
b) Pré-deformação de 5%, 45°



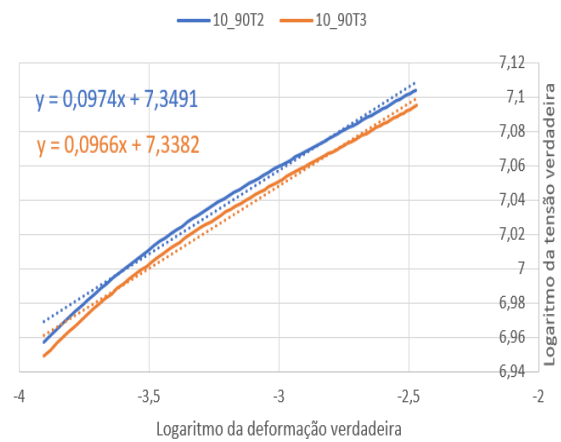
c) Pré-deformação de 5%, 90°



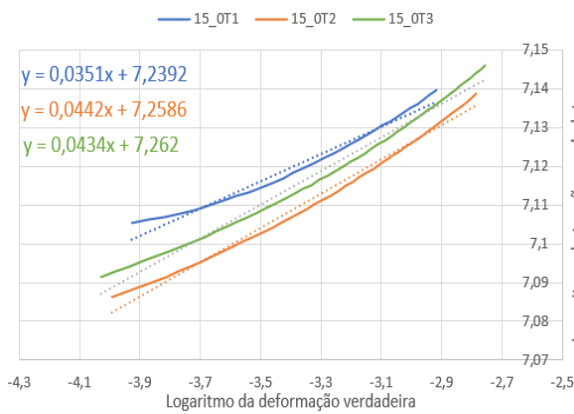
d) Pré-deformação de 10%, 0°



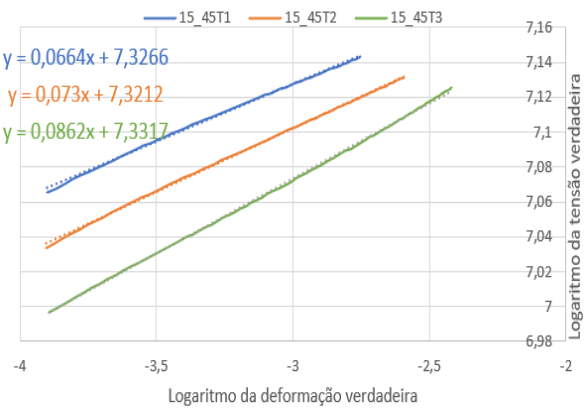
e) Pré-deformação de 10%, 45°



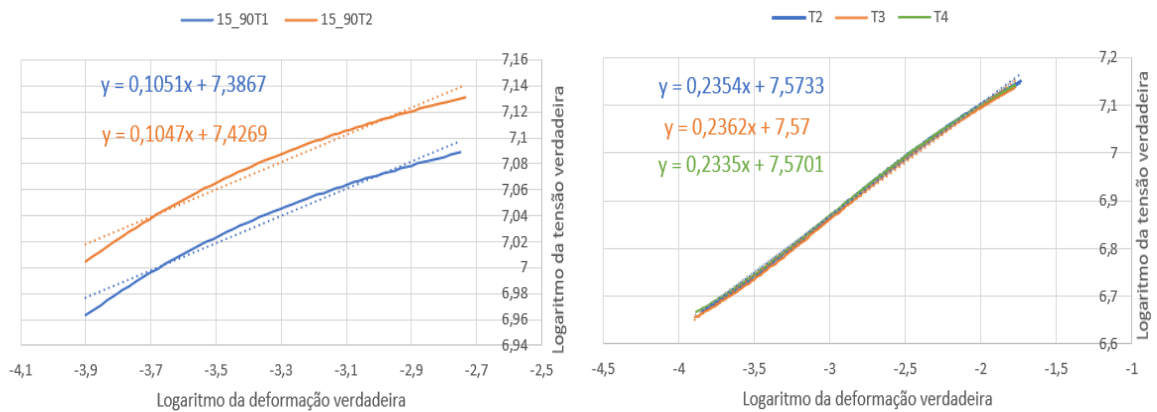
f) Pré-deformação de 10%, 90°



g) Pré-deformação de 15%, 0°



h) Pré-deformação de 15%, 45°



i) Pré-deformação de 15%, 90°

j) Sem pré-deformação

Figura 4.12 – Gráficos do logaritmo da deformação verdadeira vs logaritmo da tensão verdadeira para cada pré-deformação e direção de laminagem com o objetivo de calcular n

Na tabela que se segue apresenta-se os valores médios de encruamento para cada direção de laminagem e para cada uma das pré-deformações, assim como o valor médio da constante plástica de resistência, K , entre o ponto inicial da zona plástica e o ponto de força máxima durante os ensaios de tração.

Tabela 4.5 – Valores de coeficiente de encruamento, n , e constante plástica de resistência, K , para cada uma das pré-deformações e direções de laminagem

Coeficiente de encruamento, n				Constante plástica de resistência, K		
Orientação	0	45	90	0	45	90
Pré-deformação						
5%	0,129	0,118	0,108	1523	1534	1674
10%	0,067	0,080	0,097	1460	1566	1821
15%	0,041	0,075	0,105	1402	1658	2132
Sem pré-def.	0,234			1853		

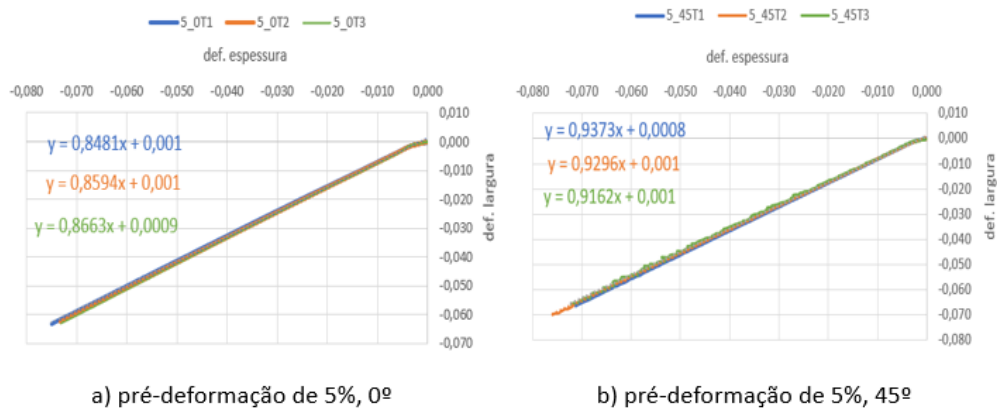
Analisando os dados da tabela anterior, verificou-se que existe uma diminuição de encruamento nos provetes com orientação de 0° à medida que se aumentava a pré-deformação, o que faz sentido. Os provetes com orientação de 0° em relação à direção de laminagem, já tinham sido deformados nesta direção anteriormente no ensaio de tração ao provete de maiores dimensões, portanto é natural que o encruamento diminua e que a força necessária para os deformar plasticamente seja menor à medida que a pré-deformação aumente. Por outro lado, o aumento da pré-deformação fez com que se verificasse maior encruamento nos provetes de 90° em relação às outras direções a partir de uma pré-deformação de 10%, apesar de o valor em si se manter semelhante em todas

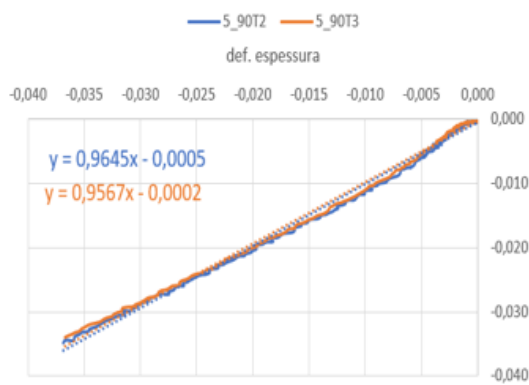
as pré-deformações. Isto deve-se ao facto de nesta orientação, os provetes terem menor tensão limite de elasticidade e significa também que existe aumento da resistência à deformação plástica com o aumento da carga, comparativamente aos provetes com outras orientações. Em resumo, nos provetes com orientação de 0° e 45°, uma maior pré-deformação diminui o coeficiente encruamento, visto que há maior facilidade das discordâncias em se moverem numa direção transversal à que se tinham movido anteriormente. Já nos provetes com orientação de 90°, o valor do encruamento não apresenta grandes mudanças com o aumento da pré-deformação, mas a partir da pré-deformação de 10%, passa a apresentar valores maiores comparativamente às outras orientações.

4.4 Anisotropia

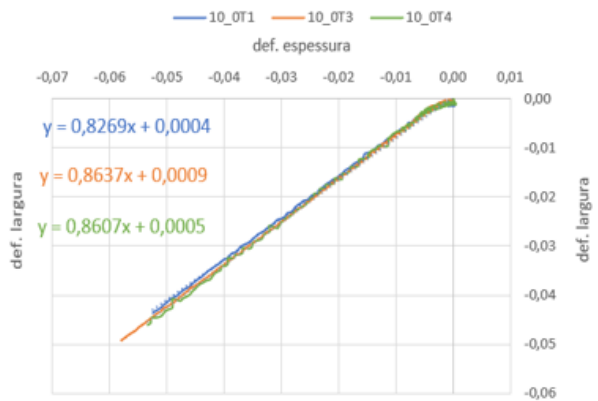
De seguida, foi realizado um estudo do aço em relação à sua anisotropia. Sendo a anisotropia, r , é a razão entre a deformação da largura, ε_w , e a deformação da espessura, ε_t , foi possível obter a anisotropia de cada provete e comparar os resultados para cada pré-deformação e orientação em relação à direção de laminação. A partir dos valores de variação de largura e comprimento registados pelo software durante o ensaio de tração, é possível calcular a evolução da espessura.

Tendo obtido os parâmetros da deformação sobre a largura e espessura, construíram-se os gráficos da figura 4.13, em que os declives representam o valor da anisotropia de cada provete.

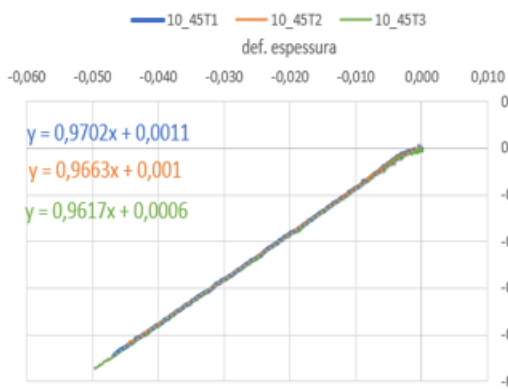




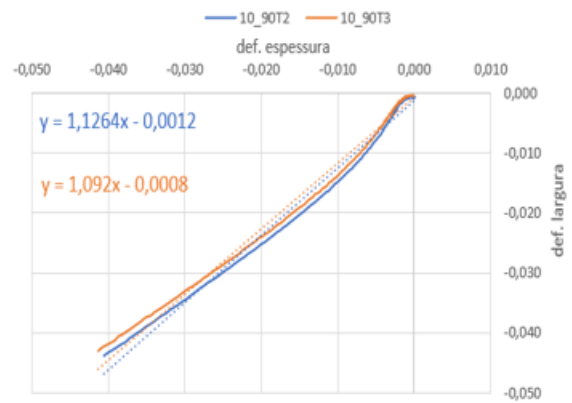
c) pré-deformação de 5%, 90º



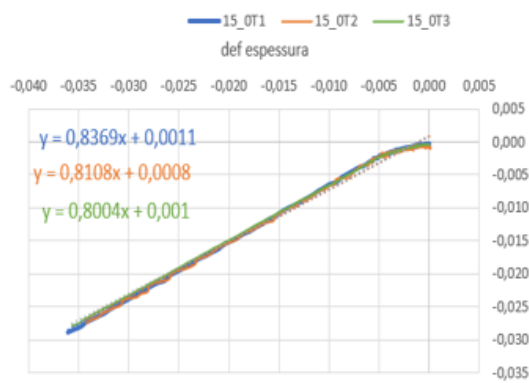
d) pré-deformação de 10%, 0º



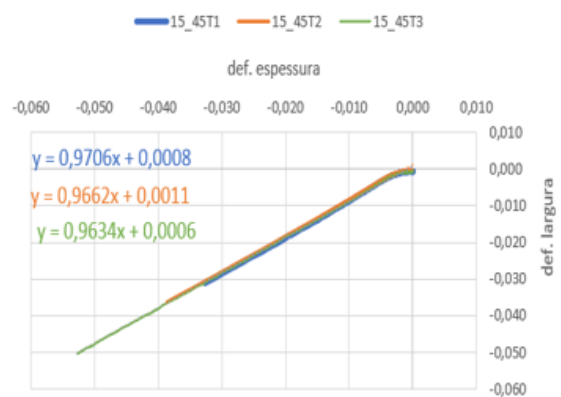
e) pré-deformação de 10%, 45º



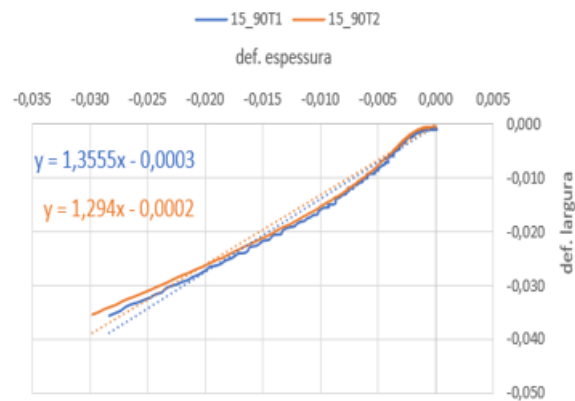
f) pré-deformação de 10%, 90º



g) pré-deformação de 15%, 0º



h) pré-deformação de 15%, 45º



i) pré-deformação de 15%, 90º

Figura 4.13 – Gráfico da deformação da espessura e da deformação da largura com o objetivo de calcular o coeficiente de anisotropia, r , para cada pré-deformação e direção de laminagem

A partir dos valores do declive dos gráficos, foi possível calcular a anisotropia normal e anisotropia planar para cada pré-deformação. Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores calculados, em que r_x é o valor do declive de cada gráfico que representa o coeficiente de anisotropia de cada provete individual para uma orientação x , r_x médio representa a média dos valores do coeficiente de anisotropia para uma mesma orientação, r_m representa a anisotropia normal e Δr é a anisotropia planar.

Tabela 4.6 - Valores do coeficiente de anisotropia normal e anisotropia planar para cada direção estudada para uma pré-deformação de 5%

Pré-deformação de 5%								
Direção	0			45			90	
Provete	5_OT1	5_OT2	5_OT3	5_45T1	5_45T2	5_45T3	5_90T2	5_90T3
r_x	0,848	0,859	0,866	0,937	0,930	0,916	0,965	0,957
r_x médio	0,858			0,928			0,961	
r_m	0,923							
Δr	-0,0095							

Tabela 4.7 - Valores do coeficiente de anisotropia normal e anisotropia planar para cada direção estudada para uma pré-deformação de 10%

Pré-deformação de 10%								
Direção	0			45			90	
Provete	10_OT1	10_OT3	10_OT4	10_45T1	10_45T2	10_45T3	10_90T2	10_90T3
r_x	0,827	0,864	0,861	0,970	0,966	0,962	1,126	1,092
r_x médio	0,850			0,966			1,109	
r_m	0,973							
Δr	0,0139							

Tabela 4.8 - Valores do coeficiente de anisotropia normal e anisotropia planar para cada direção estudada para uma pré-deformação de 15%

Pré-deformação de 15%								
Direção	0			45			90	
Provete	15_OT1	15_OT2	15_OT3	15_45T1	15_45T2	15_45T3	15_90T1	15_90T1
r_x	0,837	0,811	0,800	0,971	0,966	0,963	1,356	1,294
r_x médio	0,816			0,967			1,325	
r_m	1,019							
Δr	0,1036							

Analisando os dados das tabelas, verifica-se que nos provetes com orientação de 90° em relação à direção de laminagem, apresentam maior coeficiente de anisotropia. Significa que nestes provetes, tende a existir uma resistência maior à deformação na direção da espessura comparativamente aos provetes das outras direções, ou seja, há maior deformação na direção da largura.

Notou-se que este efeito aumenta com o aumento da pré-deformação, sendo que na pré-deformação de 15%, a anisotropia média, r_m , é superior a 1, o que significa que num processo de deformação plástica, uma chapa com estas características irá sofrer em média, uma maior deformação na direção da largura em relação à deformação sofrida na direção da espessura. Os valores da anisotropia planar, Δr , tiveram um ligeiro aumento com a pré-deformação, mas mantiveram-se sempre perto do zero.

4.5 Coeficiente de Poisson

Na tabela que se segue, pode-se ver os valores médios de ν , para cada pré-deformação e direção de laminagem num intervalo a meio da zona elástica.

Tabela 4.9 – Valores de coeficiente de Poisson na zona elástica para cada pré-deformação e direção de laminagem

Provete	ν
5_0	0,298
5_45	0,327
5_90	0,387
10_0	0,341
10_45	0,328
10_90	0,376
15_0	0,304
15_45	0,359
15_90	0,396
Sem pré-def.	0,354

O valor de coeficiente de Poisson esperado na zona elástica era de 0,3 para este material. Tendo isso em conta, podemos verificar que os valores coincidiram com o esperado, apresentando valores mais elevados na direção de laminagem de 90°, ou seja, o aço apresenta uma menor deformação na largura e maior deformação na espessura durante a zona elástica, comparativamente aos provetes de 0° e 45°.

4.6 Alteração da trajetória de deformação

Juntando as curvas médias de todos os provetes testados com a curva do material sem pré-deformação no mesmo gráfico, é possível observar que existiram alterações da trajetória de deformação dos provetes diferentes para determinadas orientações em relação à direção de laminagem (Figura 4.1)

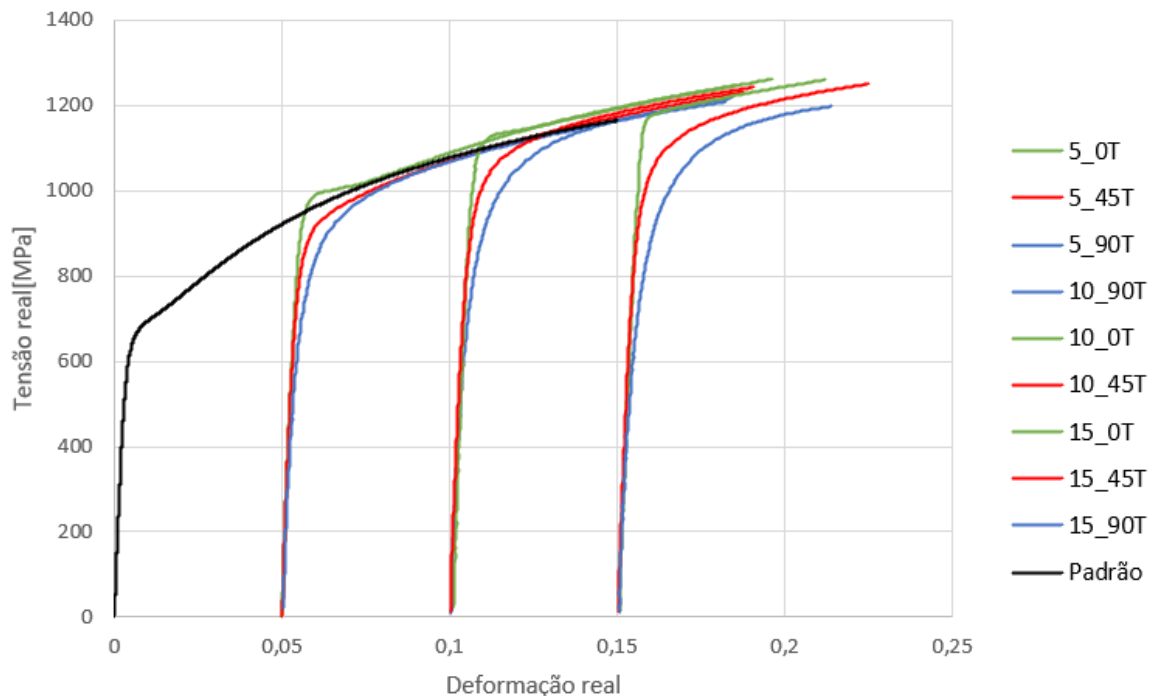


Figura 4.14 – Gráficos tensão-deformação real dos provetes de diferentes pré-deformações e orientações em relação à direção de laminagem

Observando a Figura 4.14, vemos que nos provetes com orientação de 45° e 90° em relação à direção de laminagem apresentam menor tensão limite de elasticidade em relação ao material sem pré-deformação, sendo que nos provetes de 90° se nota uma diminuição mais acentuada à medida que a pré-deformação aumenta. Como referido no capítulo 2, esta diminuição da tensão limite de elasticidade após uma pré-deformação é conhecida por efeito de Bauschinger.

Capítulo 5 – Conclusões gerais e propostas de futuros trabalhos

5.1 Conclusão

Com este trabalho, foi possível perceber a grande importância do desenvolvimento de aços avançados de alta resistência de terceira geração na indústria automóvel. A procura por aços leves, mas com grande resistência é vital para a construção de partes de veículos para os fabricantes, mas também para os consumidores, devido ao melhoramento do desempenho do veículo e ao aumento da durabilidade do material que permite diminuir os custos de manutenção do veículo. Como a sustentabilidade tem tido um papel cada vez mais importante na indústria automóvel, a redução do peso do material contribui para uma redução de combustível utilizado e de emissões de gases poluentes.

Relativamente ao trabalho efetuado, através de ensaios de tração foram calculadas propriedades mecânicas do aço CR980XG3. Registaram-se valores de resistência à tração máxima superiores a 1100 MPa e uma média de módulo de elasticidade de cerca de 196 GPa, o que nos permite concluir desde logo que se trata de um aço de alta resistência. Calculando as anisotropias para diferentes direções de laminagem, obtiveram-se valores de anisotropia maiores na direção de 90 graus, sendo que na pré-deformação de 15%, o valor de anisotropia esteve acima de 1,20, evidenciando uma forte deformação na largura comparativamente à espessura. Esta direção apresenta valores mais elevados de encruamento, o que significa que apresenta maior resistência à deformação plástica. Mesmo nos provetes com pré-deformações para diferentes direções, verificaram-se valores relativamente elevados de tensão máxima acompanhados de deformações uniformes entre os 10% e 15%, apesar já terem passado anteriormente por um processo de pré-deformação.

Em relação à trajetória de deformação, verificou-se que os provetes com orientação de 0º apresentaram um comportamento semelhante ao material não pré-deformado, tendo apenas uma ligeira tensão limite de elasticidade mais elevada. No entanto, nas orientações transversais às direções de laminagem (45º e 90º), os provetes apresentaram uma trajetória distinta, pelo que tinham menor tensão limite de elasticidade comparativamente ao material sem pré-deformação, ou seja, verificou-se o efeito de Bauschinger.

5.2 Propostas de trabalhos futuros

Tendo em conta o presente trabalho, algumas propostas de trabalhos futuros são:

- Análise da microestrutura de um aço AHSS através do microscópio após deformações
- Realizar outro tipo de ensaios mecânicos neste material como por exemplo, ensaios de compressão, flexão e de dureza

Bibliografia

- [1] Baluch, N., Udin, Z. M., & Abdullah, C. S. *Advanced High Strength Steel in Auto Industry: an Overview. Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2014. <https://doi.org/10.48084/etasr.444>
- [2] *The Role of Ultra and Advanced High Strength Steel in Cars*. (s.d.). Kloeckner Metals Corporation. <https://www.kloecknermetals.com/blog/the-role-of-ultra-and-advanced-high-strength-steel-in-cars/>
- [3] Tisza, M. *Development of Advanced High Strength Automotive Steels*, University Press, Miskolc, 2015; <https://doi.org/10.33924/amt-2021-01-02>
- [4] D Gorni, A. Aços Avançados de Alta Resistência: Microestrutura e Propriedades Mecânicas. 5º Congresso de Corte e Conformação de Metais, São Paulo, 2009;
- [5] Taub, A. I., & Luo, A. A. *Advanced lightweight materials and manufacturing processes for automotive applications. MRS Bulletin*, 40(12), 1045–1054, 2015. <https://doi.org/10.1557/mrs.2015.268>
- [6] Faria Neto, A., Cappi de Freitas, F., Elias Furtado, A., Fukugauchi, C., Pereira, M., & Abdalla, A. *Desenvolvimento de aços avançados de alta resistência na indústria automobilística: importante alternativa para uma maior eficiência energética* <https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/210705258.pdf>
- [7] *Estampagem de Metal vs. Puncionamento: Principais Aplicações e Diferenças*. (s.d.). Alibaba.com Reads. <https://baba-blog.com/pt/metal-stamping-vs-punching-key-applications-differences/>
- [8] *Defining Steels*. (s.d.). AHSS Guidelines. <https://ahssinsights.org/metallurgy/defining-steels/>
- [9] Dalcin, Rafael & Fonseca Oliveira, Leonardo & da Silva Rocha, Alexandre. CARACTERIZAÇÃO DO AÇO DIN 18MNCRSIMO6-4 NITRETADO A PLASMA COM MISTURA GASOSA COMPOSTA POR 76% N2, 2019
- [10] A. Magalhães, Análise da influência do processamento termomecânico na microestrutura, propriedades mecânicas e textura cristalográfica de um aço 0,08C-8Mn (pp 22-26), Universidade Federal de Minas Gerais, 2018;
- [11] *WorldAutoSteel*, 2009. *Advanced High Strength Steel (AHSS). Application Guidelines, Version 7.1*. <https://ahssinsights.org/?s=Steel+types>

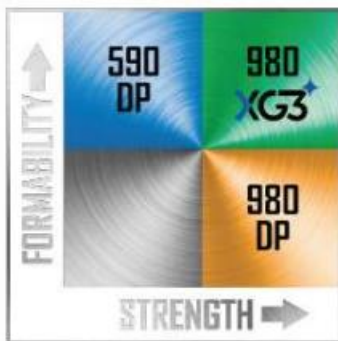
- [12] Tisza, M., *Three Generations of Advanced High Strength Steels in the Automotive Industry*, University Press, Miskolc, 2015;
- [13] Silva, A. d. P., Cândido, L. C., Trindade, V. B., & Dornelas, P. H. G. ANÁLISE DOS EFEITOS DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS DE TÊMPERA E PARTICIONAMENTO, NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TRÊS AÇOS C-MN DE APLICAÇÃO API. *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração*, 16(4), 504–511, 2019 <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20191816>
- [14] *TRIP Assisted Bainitic Ferrite Archives*. AHSSGuidelines. <https://ahssinsights.org/tag/trip-assisted-bainitic-ferrite/>
- [15] *Products - Advanced High-Strength Steel - www.ussteel.com*. (s.d.). <https://www.ussteel.com/customers/products/advanced-high-strength-steel>
- [16] Filipe, B. Sensibilidade à mudança de trajetória de deformação no aço TWIP980. Universidade de Aveiro, 2014
- [17] Lopes, A. Análise microestrutural das instabilidades plásticas em materiais metálicos. Universidade de Aveiro, 2001
- [18] Tensile testing – complete guide to testing metals, polymers and composite materials. (s.d.). <https://biopdi.com/tensile-testing/>
- [19] Ensaio de tração polipropileno - Rio Lab. (s.d.). Rio Lab. <https://www.riolabensaios.com.br/ensaio-tracao-polipropileno>
- [20] *Stress-Strain Curve | How to Read the Graph?* (s.d.). Fractory. <https://fractory.com/stress-strain-curve/>
- [21] *Tensile Testing*. (s.d.). AHSS Guidelines. <http://ahssinsights.org/forming/testing-characterization-forming/tensile-testing/>
- [22] Ruben, P. Estudo de retorno elástico em ligas de alumínio para indústria automóvel. Universidade de Aveiro, 2021
- [23] *Engineering Stress/Strain vs True Stress/Strain – Yasin ÇAPAR*. (s.d.). Yasin ÇAPAR – Finite Element & Volume Analysis Engineer. <https://yasincapar.com/engineering-stress-strain-vs-true-stress-strain/>
- [24] *True Stress - True Strain Curve: strain-hardening exponent*. (s.d.). <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts∓NM=279>

- [25] Luís, C. TENACIDADE À FRATURA E LIMITES DE ENFORMABILIDADE EM MODO I E II. Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2015
- [26] Rodrigues, J. M. C., Martins, P. A. F. Tecnologia Mecânica, Escolar Editora, Lisboa, 2010
- [27] *Rolling direction Archives.* (s.d.). AHSS Guidelines. <https://ahssinsights.org/tag/rolling-direction/>
- [28] Banabic, D. (2000). *Anisotropy of Sheet Metal*. In: Banabic, D. (eds) *Formability of Metallic Materials. Engineering Materials*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04013-3_4
- [29] maruthiprasad28. (2022, 22 de dezembro). *sheetmetal*. studylib.net. <https://studylib.net/doc/25990372/sheetmetal>
- [30] PRODUCTION TECHNIQUES, SHEET-METAL FORMING PROCESSES, DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING ISFAHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, https://badrossamay.iut.ac.ir/sites/badrossamay.iut.ac.ir/files/files_course/production_12.pdf
- [31] Ensaio mecânicos dos materiais <https://pt.slideshare.net/djoaoalberto/9-ensaio-mecanicosdosmateriais>
- [32] *What is Poisson's ratio?* (s.d.). Welcome to silver. <http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/PoissonIntro.html>
- [33] *Ensaio de Tração - Física.* (s.d.). InfoEscola. <https://www.infoescola.com/fisica/ensaio-de-tracao/>
- [34] Fonstein, N., *Advanced High Strength Sheet Steels*. Springer International Publishing, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19165-2>
- [35] Magalhães, A. Análise da influência do processamento termomecânico na microestrutura, propriedades mecânicas e textura cristalográfica de um aço 0,08C-8Mn, 2018. Universidade Federal de Minas Gerais, 2018
- [36] Carrie M. Tamarelli, C. M. AHSS 101 – *The evolving use of advanced high-strength steels for automotive applications*. Steel Market Development Institute, Southfield, 2011;
- [37] M. Y. Demeri, *Advanced High-Strength Steels : Science Technology, and Application*. ASM International, 2013.

- [38] Souto, N.M., Caracterização do Comportamento Mecânico de Aços de Alto Desempenho, Universidade de Aveiro, 2011;
- [39] Kuziak, R., Kawalla, R., Waengler, S.: *Advanced high strength steels for automotive industry: a review*. Arch. Civil. Mech, 2008;
- [40] GOM, Aramis User Manual-Software. 2009
- [41] D. K. Matlock, J. G. Speer, E. De Moor, P. J. Gibbs, *Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive application: an overview*, 2012.
- [42] E. De Moor, P. J. Gibbs, J. G. Speer, D. K. Matlock, J. G. Schroth, «*Strategies for third-generation advanced high-strength steel development*», *Iron Steel Technol.*, 2010
- [43] Finfrock, C. B., Clarke, A. J., Thomas, G. A., & Clarke, K. D. ,2020. *Austenite Stability and Strain Hardening in C-Mn-Si Quenching and Partitioning Steels*. *Metallurgical and Materials Transactions*. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05666-8>

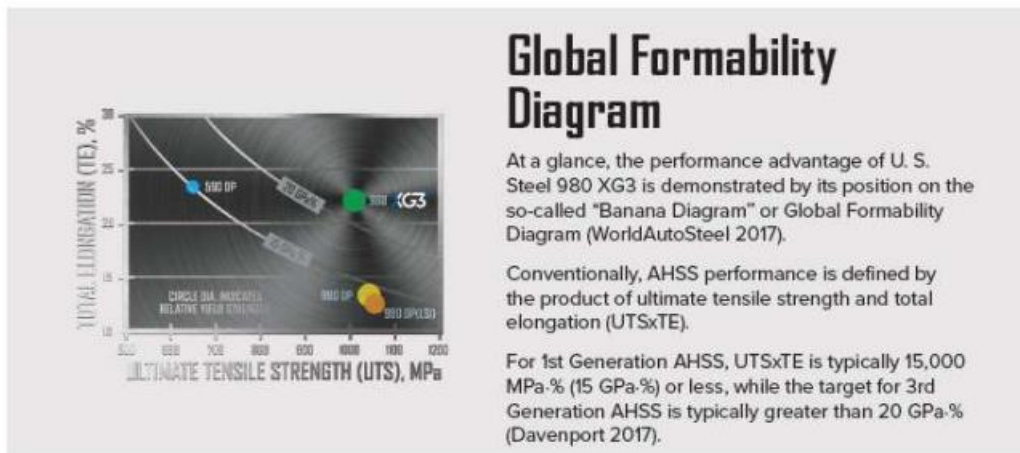
ANEXOS

Anexo A – Folhetos com características e propriedades do aço CR980XG3



980 XG3 Concept

The true measurement of superior strength is adaptability. Get the formability of a 590 with the strength of a 980. Introducing XG3 from U. S. Steel.





INTRODUCTION

AUTOMOTIVE SOLUTIONS



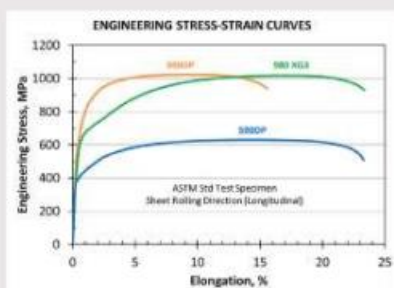
PROPERTIES & STRUCTURE

Specimen	Orientation ^a	U. S. Steel 980 XG3: Typical Tensile Properties		
		YS, MPa	UTS, MPa	TE, %
ASTM Std	L	640	1,020	23
JIS No. 5	T	660	1,030	25

^a L = longitudinal (rolling direction, RD); T = transverse (90° from RD)
^b YS = yield strength, UTS = ultimate tensile strength, TE = total elongation

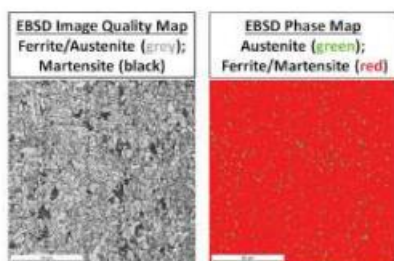
Typical Properties: U. S. Steel 980 XG3

U. S. Steel 980 XG3 has an excellent combination of strength and ductility with a low yield-to-tensile ratio (YS/UTS < 0.7) and total elongation consistently above 20%.



Stress-Strain Curves

The unique, sustained work-hardening behavior of U. S. Steel 980 XG3 is revealed by its tensile stress-strain behavior. The net result is greater than 60% strength increase over 590DP and approximately 50% greater total elongation vs 980DP.



Microstructure: U. S. Steel 980 XG3

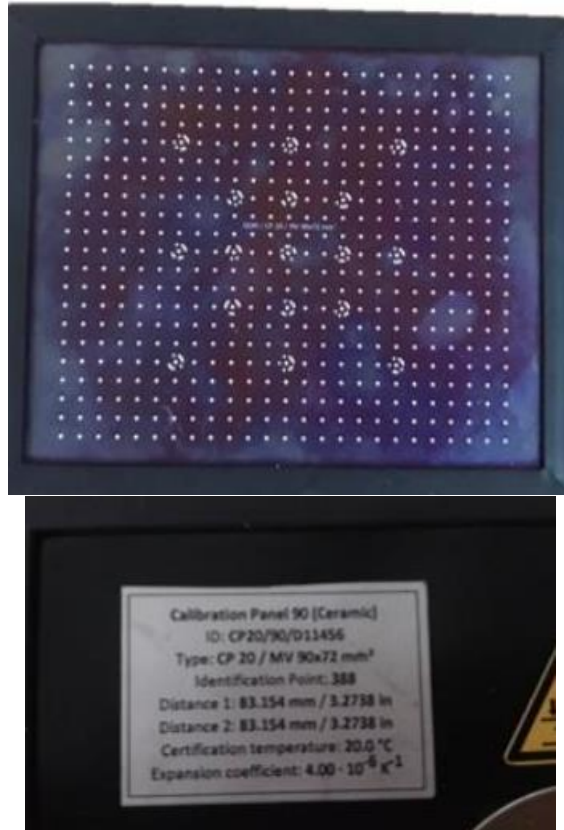
U. S. Steel 980 XG3 derives exceptional properties from its complex multi-phase microstructure – a fine, uniform mixture of ferrite, martensite and austenite. Here, electron back-scattered diffraction (EBSD) reveals the distribution of various micro-constituents.

Anexo B – Tabela da lente de 50mm do Aramis

3.6 50 mm Lens (ARAMIS 5M, 5M LT)

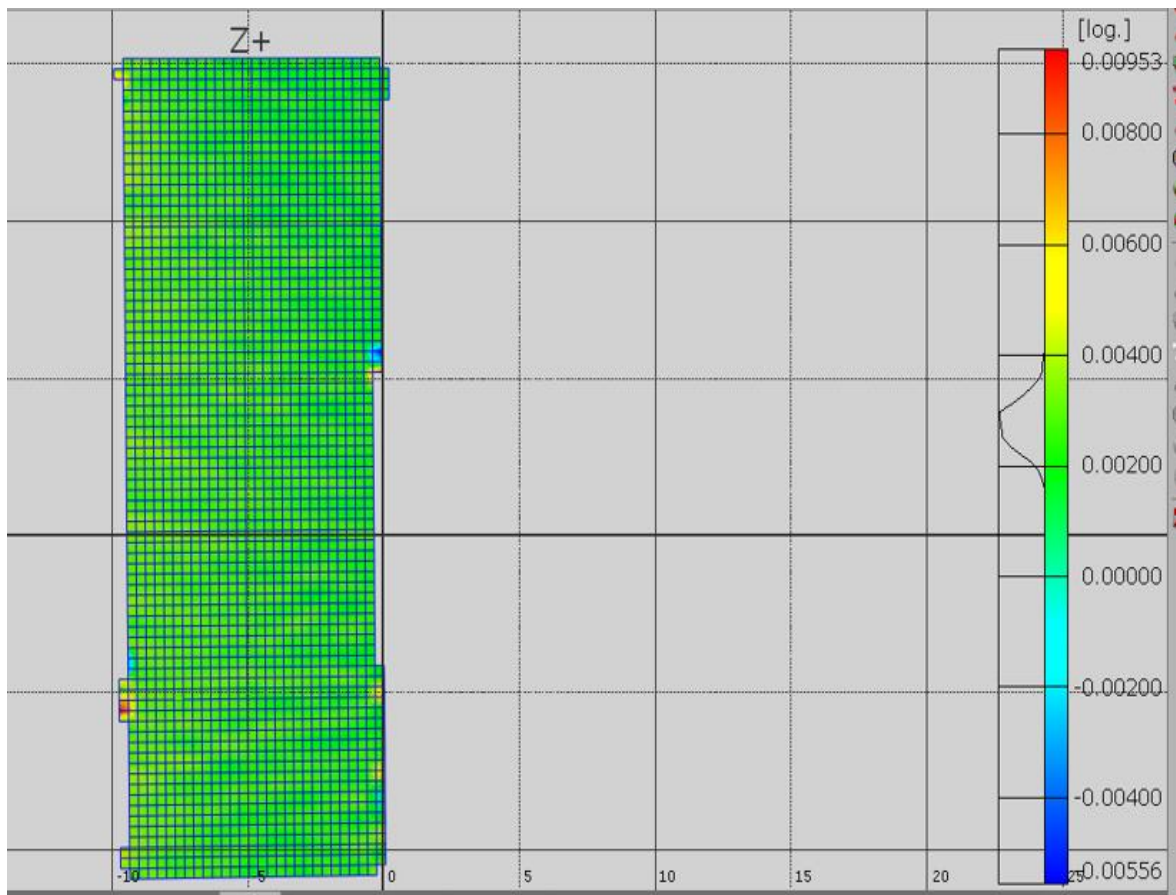
Sensor	Lens	Measuring volume (mm ³)	Comment	Min. length camera support (mm)	Distance ring (mm)	Measuring distance (mm)	Slider distance (mm)	Camera angle [°]	Calibration Object	1,4
ARAMIS 5M	Tiltar 50mm	15 x 13	—	500	20	205	MS	26	CQ 15x12	—
		20 x 17	—	500	10	230	64	25	CQ 23x18	—
		25 x 21	—	500	10	250	74	25	CQ/CP20 30x24	—
		35 x 29	—	500	—	310	98	25	CQ/CP20 30x24	—
		50 x 42	—	500	—	385	125	25	CQ/CP20 55x44	—
		65 x 55	—	500	—	485	176	25	CQ/CP20 55x44	—
		80 x 65	—	500	—	570	218	25	CP20 90x72	—
		100 x 85	—	500	—	695	270	25	CP20 90x72	—
		125 x 100	—	500	—	845	336	25	CP20 90x72	—
		150 x 130	—	800	—	995	402	25	CP20 175x140	—
		175 x 150	—	800	—	1150	472	25	CP20 175x140	—
		200 x 170	—	800	—	1300	540	25	CP20 250x200	—
		250 x 210	—	800	—	1600	674	25	CP20 250x200	—
		300 x 250	—	800	—	1920	688	21	CP20 350x280	—
		350 x 290	2)	1200 fixed	—	2160	—	31	CP20 350x280	—
		400 x 330	2)	1200 fixed	—	2490	—	27	CP20 350x280	—
500 x 420	2)	1200 fixed	—	3140	—	21	CC20 500x400	—		
750 x 630	2)	1600 fixed	—	4685	—	19	CC20 1000x800	—		
	Legend	1)	without laser pointer							
		2)	For further information please refer to the user information Hardware for ARAMIS (Fixed Base).							
		MS	Slider distance at Mech. Stop							

Anexo C – Calibrador MV90XT72 e respetivo suporte

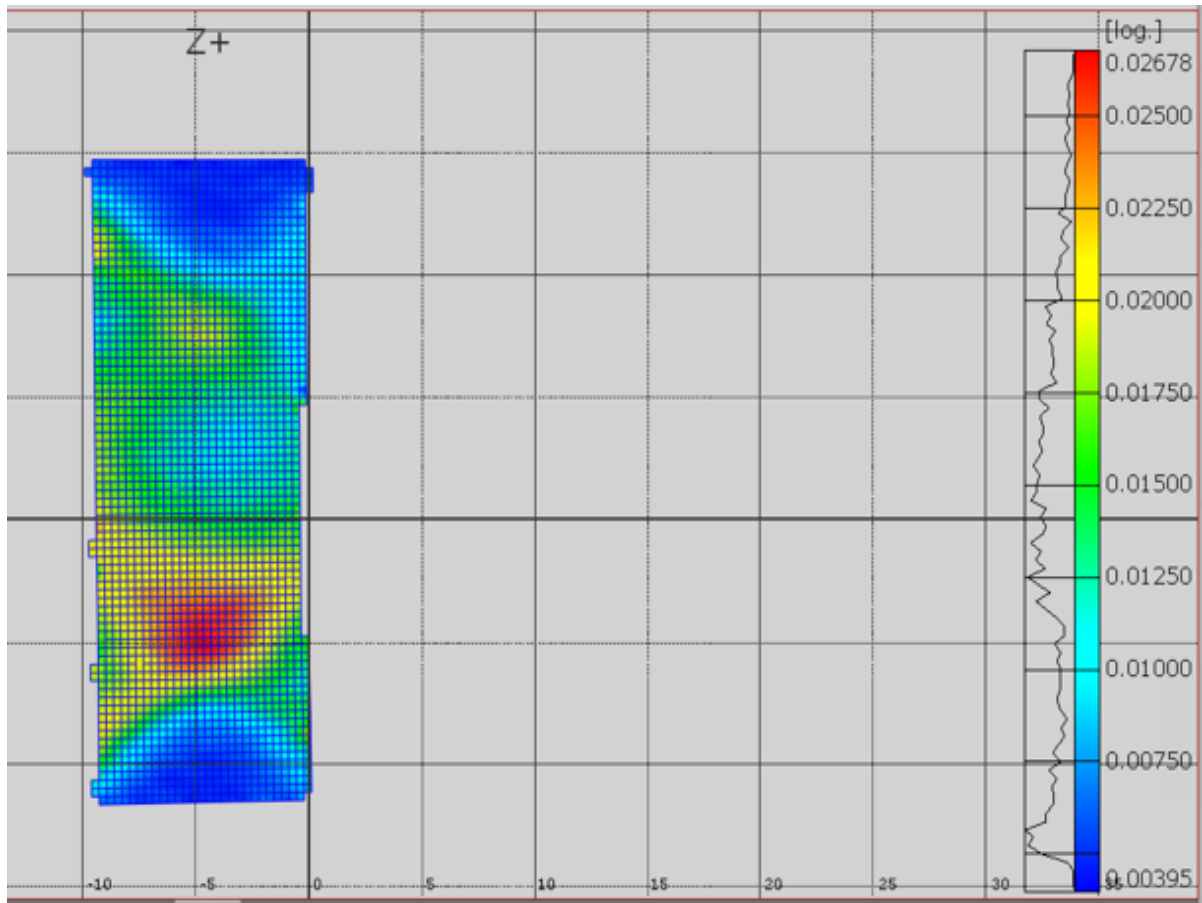


Anexo D – Distribuição de deformações no provete em diferentes zonas de deformação, calculadas pelo software Aramis

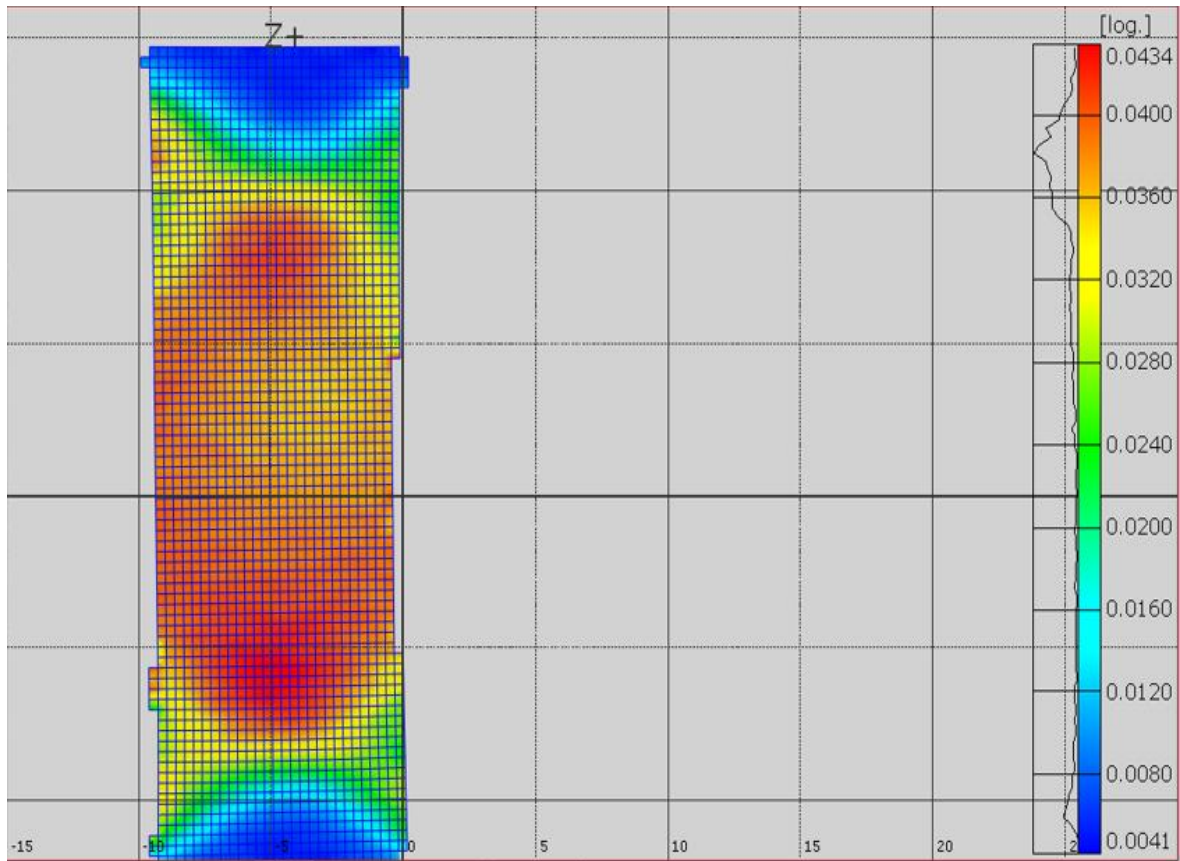
Anexo D1 – Zona elástica inicial



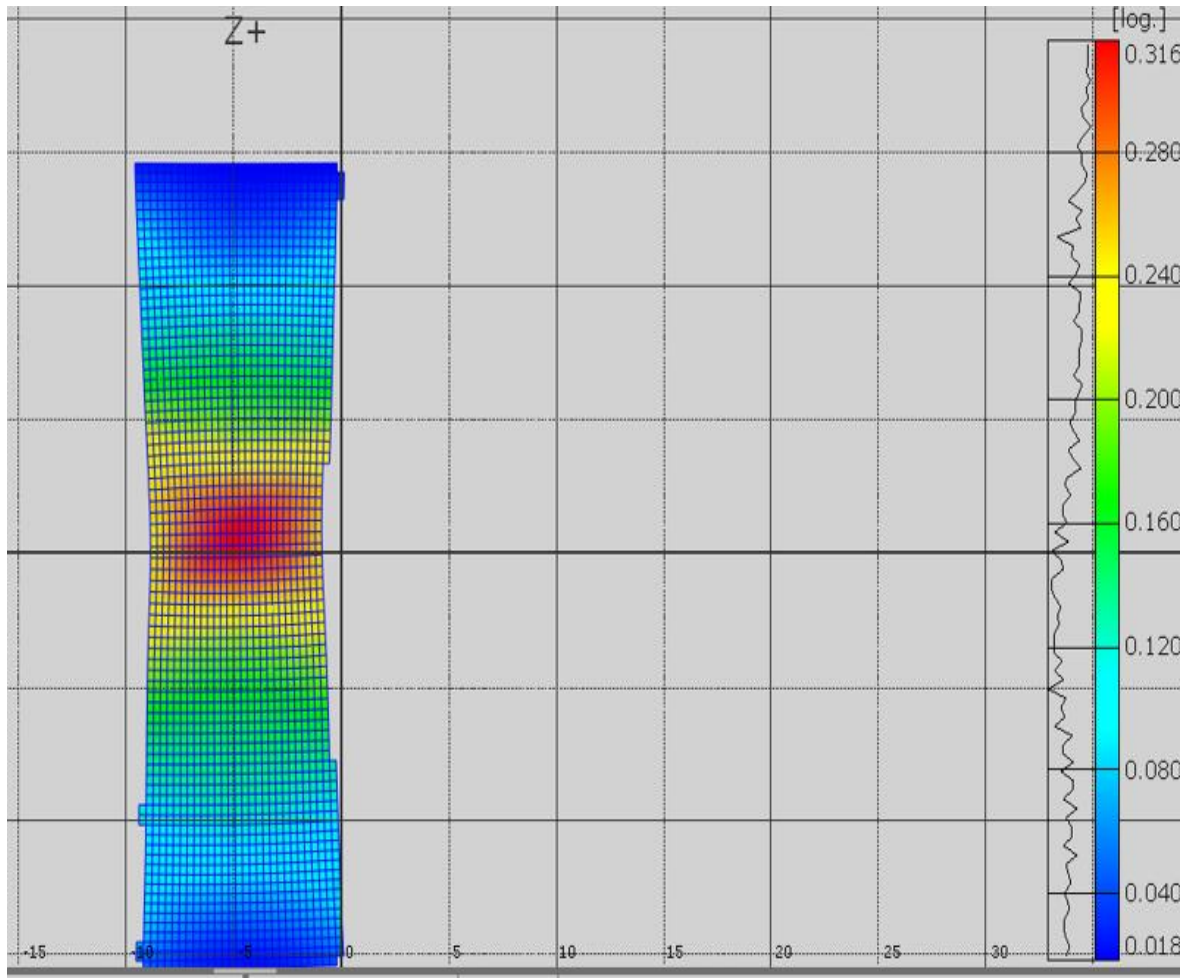
Anexo D2: Final da zona elástica



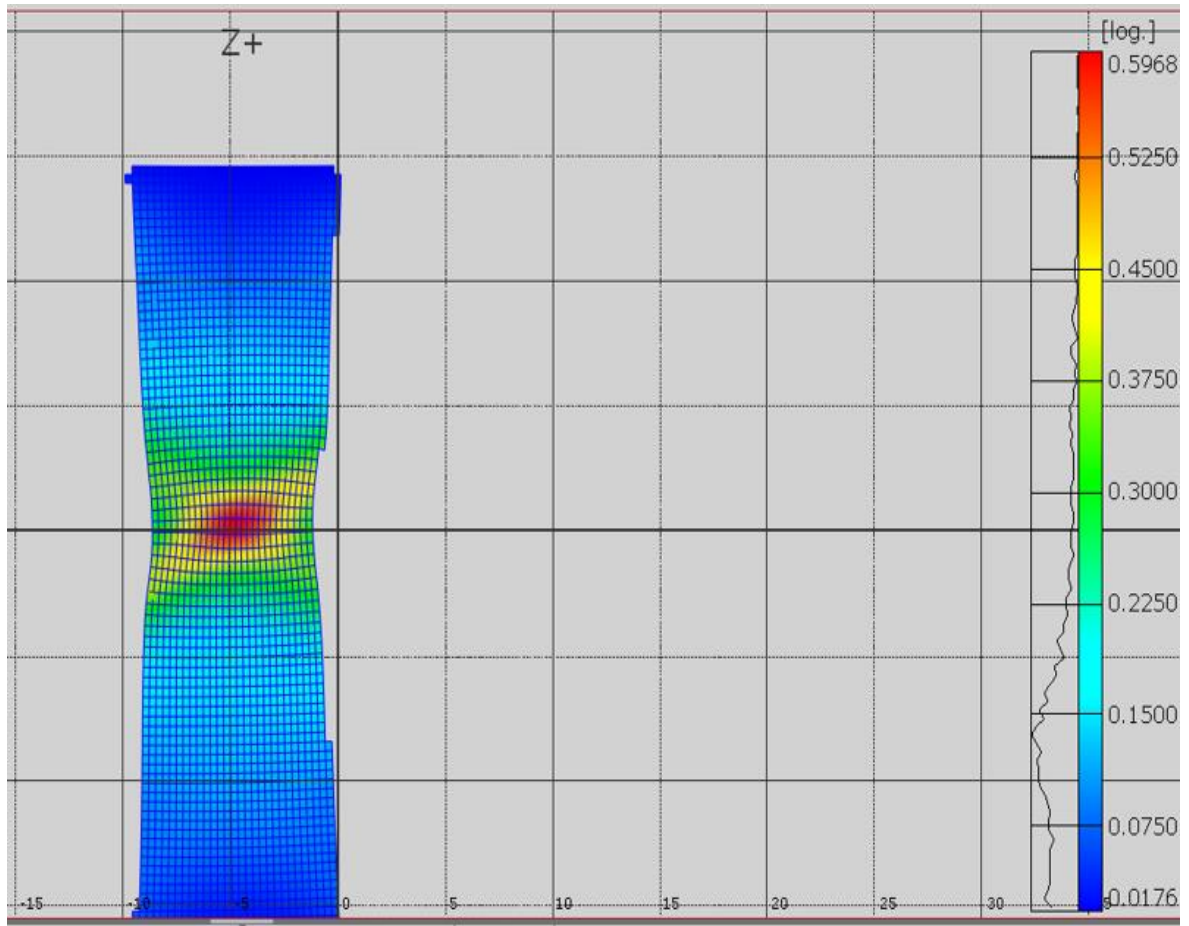
Anexo D3: Zona próxima do ponto de tensão máxima



Anexo D4: Início da zona de estrição

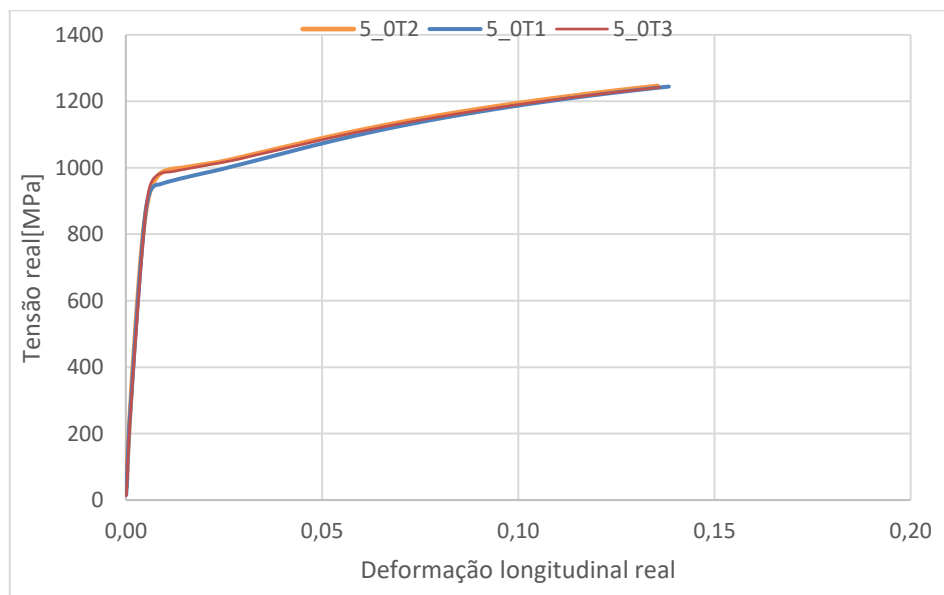


Anexo D5: Zona pré-ruptura

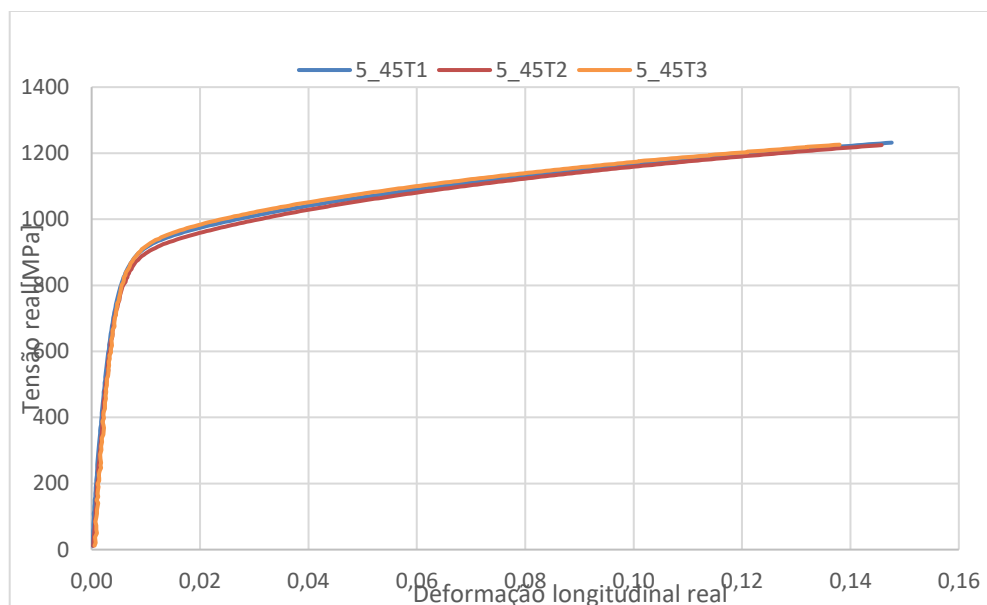


Anexo E: Gráficos tensão-deformação real dos provetes para diferentes pré-deformações e direções de laminagem

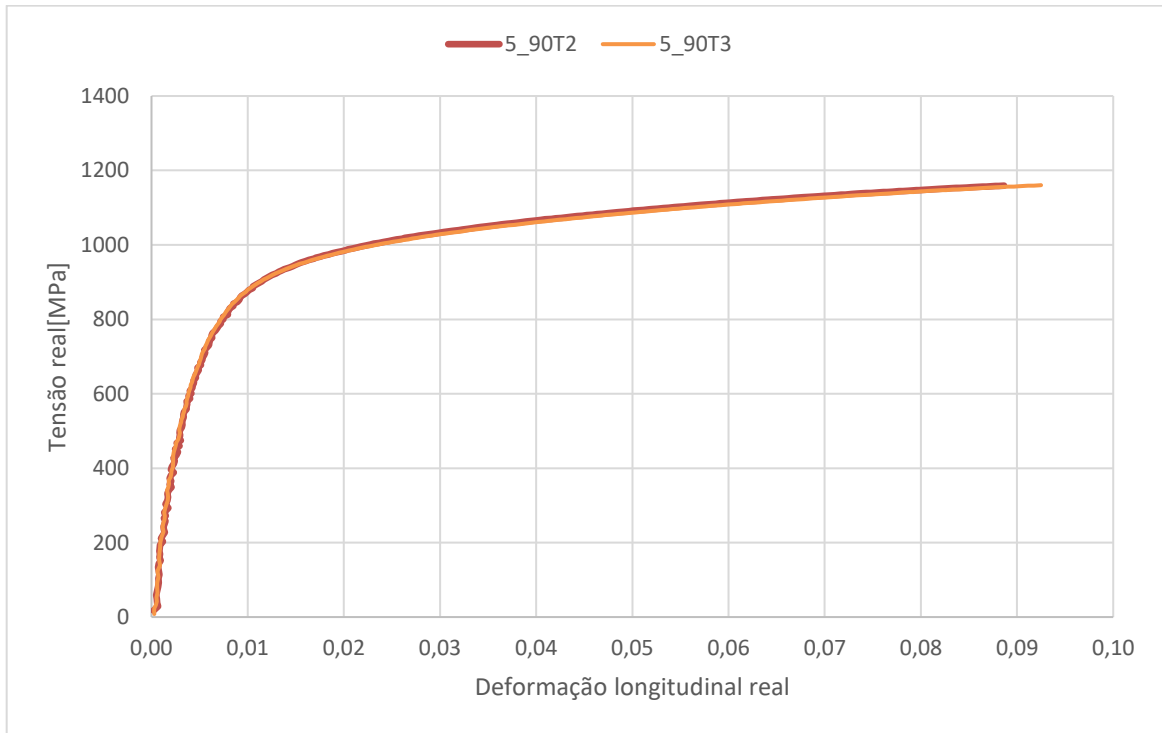
Pré-deformação 5%, Direção de laminagem 0°



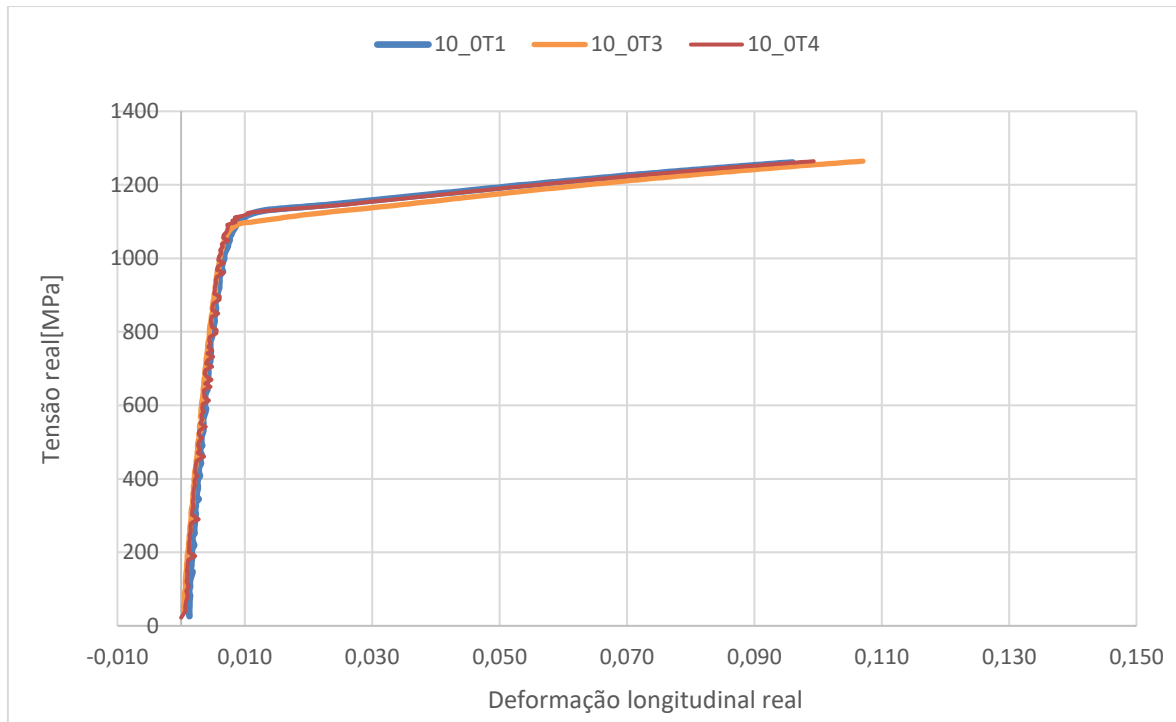
Pré-deformação 5%, Direção de laminagem 45°



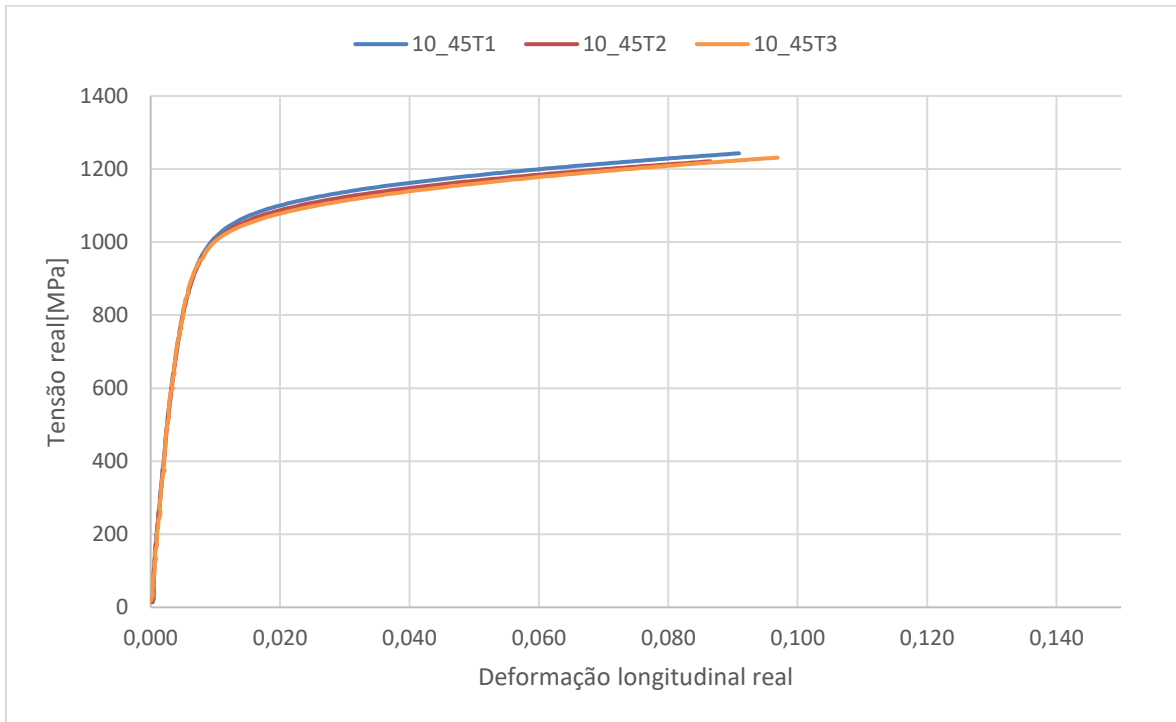
Pré-deformação 5%, Direção de laminagem 90°



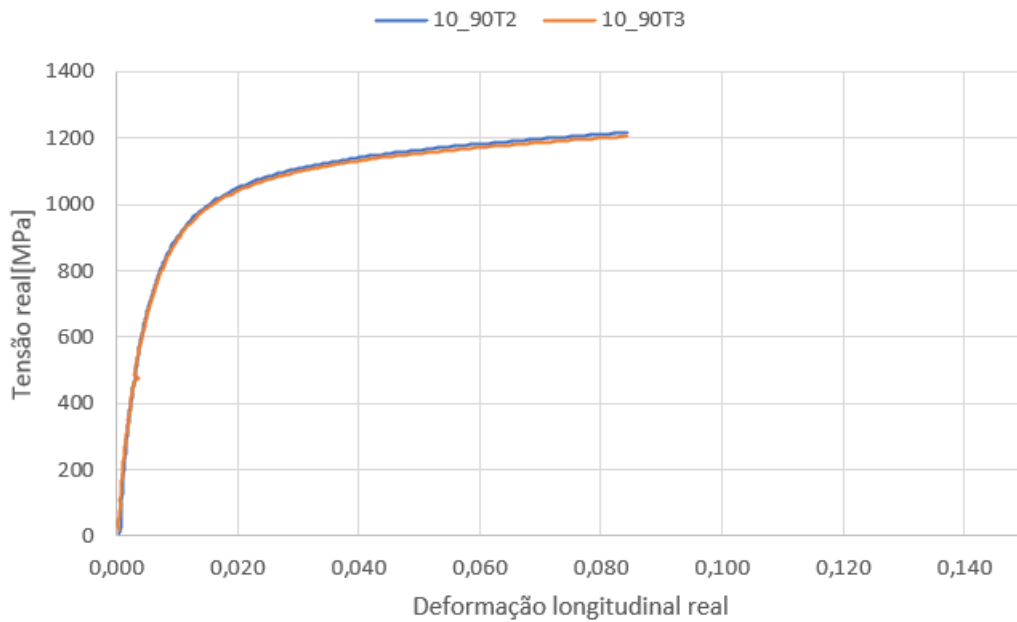
Pré-deformação 10%, Direção de laminagem 0°



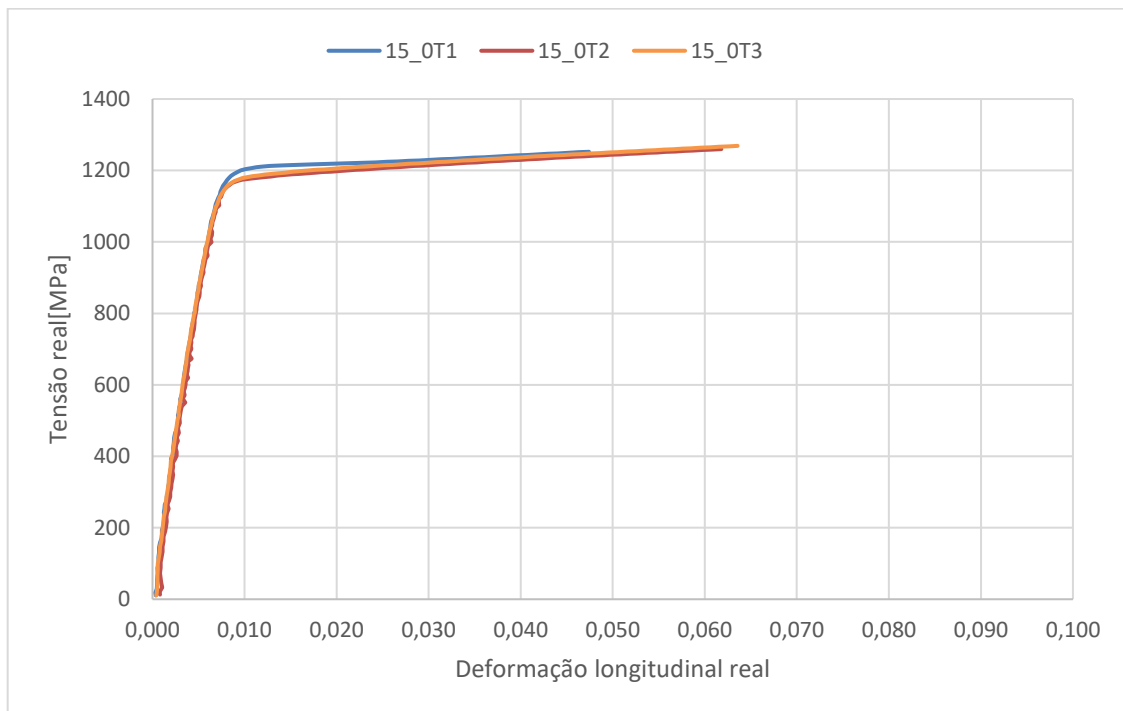
Pré-deformação 10%, Direção de laminagem 45°



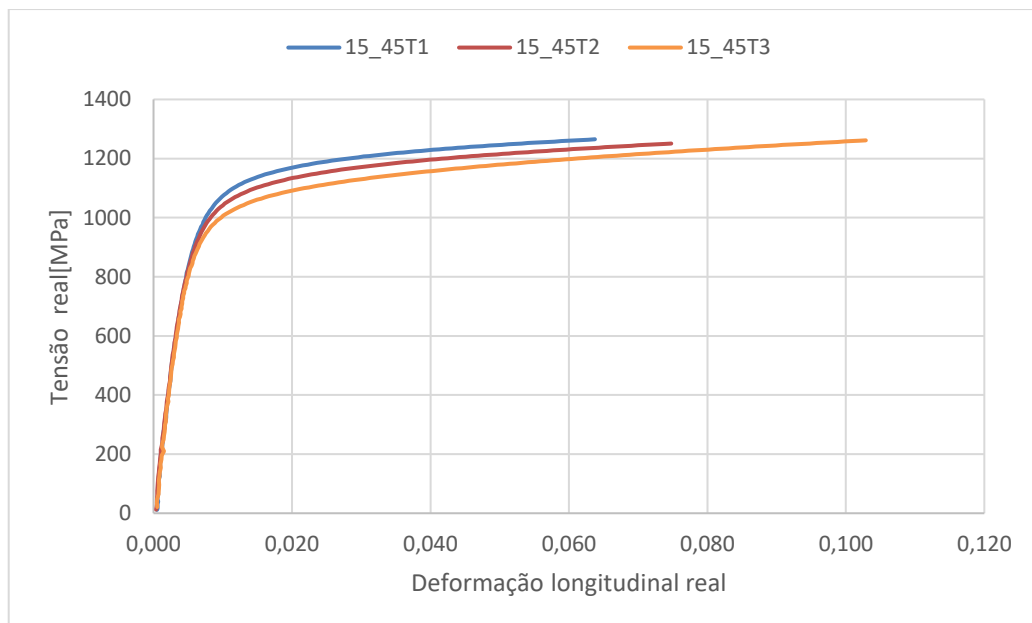
Pré-deformação 10%, Direção de laminagem 90°



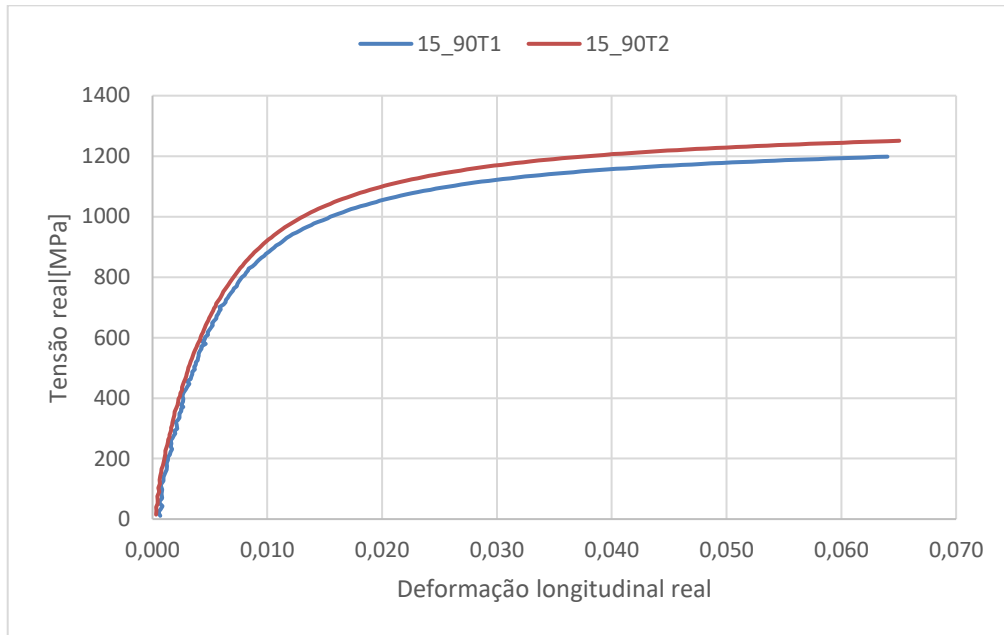
Pré-deformação 15%, Direção de laminagem 0°



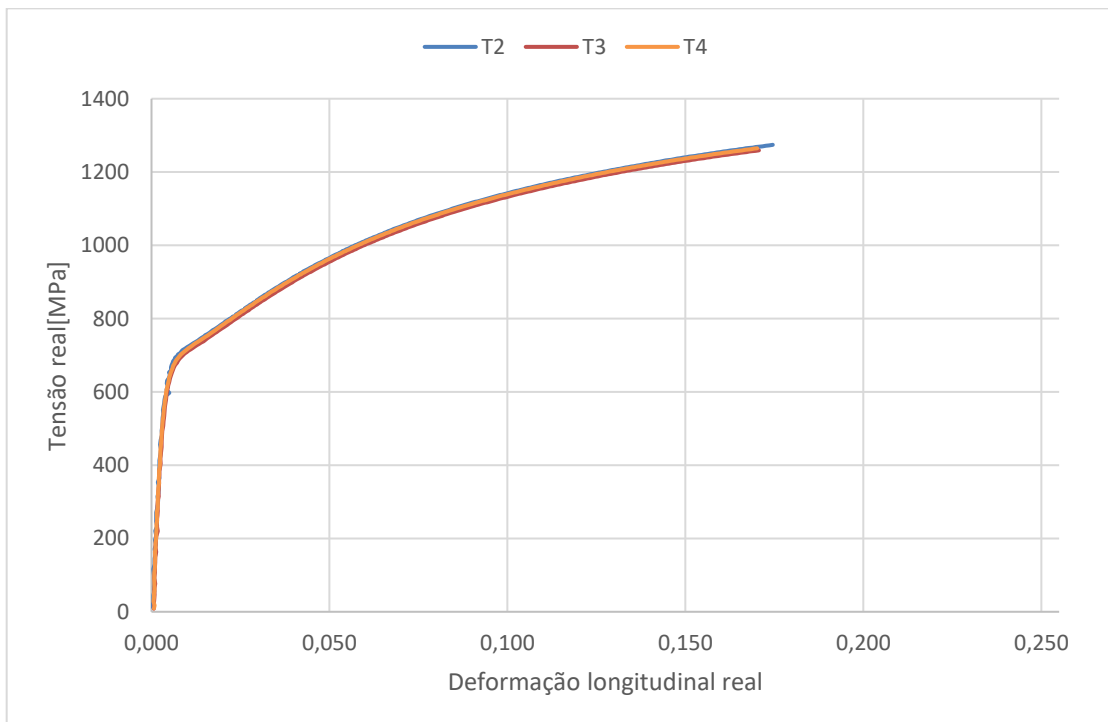
Pré-deformação 15%, Direção de laminagem 45°



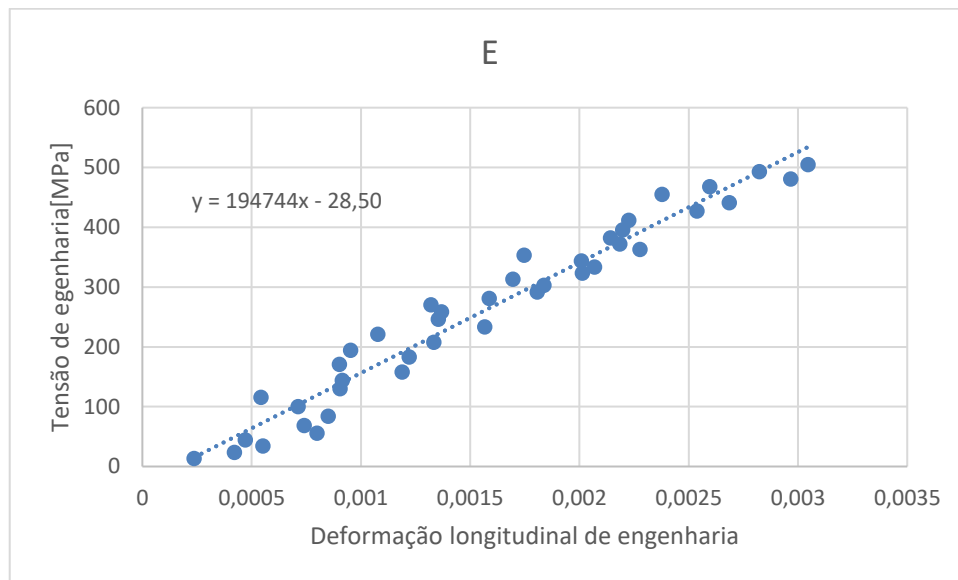
Pré-deformação 15%, Direção de laminagem 90°



Sem pré-deformação



Anexo F: Exemplo de gráfico para encontrar o módulo de Young



Anexo G: Exemplo de gráfico para encontrar a tensão limite de elasticidade

