



**João Emanuel Sardo
Rocha**

**Influência da velocidade de deformação nas
propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304**



**João Emanuel Sardo
Rocha**

**Influência da velocidade de deformação nas
propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Dr. José J. A. Grácio Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

o júri

presidente

Prof. Dr. José António de Oliveira Simões
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. José Joaquim de Almeida Grácio
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro (Orientador)

Prof. Dr. José Manuel Ferreira Duarte
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

agradecimentos

Expresso a minha gratidão ao Doutor José J. A. Grácio, orientador científico do presente trabalho e ao Doutor Haroldo Campos, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo-Horizonte, Brasil, pelo apoio constante.

Agradeço também aos responsáveis pelos Departamentos de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e do laboratório Labmec do Instituto de Soldadura e Qualidade pelos apoios e meios facultados para a realização do trabalho.

resumo

O presente trabalho teve como objectivo fundamental a análise da influência da velocidade de deformação no comportamento mecânico de uma chapa de aço inoxidável AISI 304. Para o efeito, foram realizados ensaios de tracção uniaxial a diferentes velocidades de deformação e segundo diferentes orientações no plano da chapa. Paralelamente, procedeu-se à análise da formação de martensite após ruptura e medição da temperatura dos provetes durante os ensaios. Os resultados obtidos permitiram concluir que o comportamento mecânico do aço inoxidável AISI 304 é fortemente influenciado pela velocidade de deformação. Nomeadamente, o aumento da velocidade de deformação conduz ao aumento significativo da temperatura e, conseqüentemente, à localização precoce da deformação. A análise dos resultados foi efectuada à luz da teoria de encruamento microestrutural e efeito do amaciamento térmico.

abstract

The fundamental objective of this work was to analyse the influence of strain rate on the mechanical behaviour in the AISI 304 stainless steel sheet. Tensile tests have been performed at different strain rates along different directions in the sheet plane. The formation of martensite and the temperature on the surface of the sheet samples during the tensile tests was also measured. The results obtained allowed to conclude that the mechanical behaviour of the AISI 304 stainless steel is strongly dependent on the strain rate. Namely, the increase in strain rate implied a significative increasing of the temperature and consequently premature strain localization. The analysis of these results was based on the microstructural hardening theory and the effect of thermal softening.



ÍNDICE



Simbologia	10
Capítulo I – Revisão bibliográfica	13
Capítulo II – Materiais e métodos experimentais	19
Capítulo III – Resultados e discussão	23
1. Estudo da anisotropia plástica do material	24
2. Influência da velocidade de deformação no alongamento uniforme	26
3. Análise da formação de martensite	31
4. Aumento da temperatura resultante do aumento da velocidade de deformação	32
5. O efeito do amaciamento térmico nas propriedades mecânicas do material	41
Capítulo IV – Conclusão	46
Bibliografia	49



SIMBOLOGIA



A e n'	constantes do material
b	módulo do vector de Burgers
C_0	fracção volúmica de solutos
C_1	concentração de saturação de solutos
D	coeficiente de difusão dos átomos
f_0	função que caracteriza o aumento máximo de tensão produzida por envelhecimento dinâmico por deformação
G	módulo de elasticidade transversal
L	comprimento útil do provete
k	constante de Boltzman
K	coeficiente de resistência à deformação
m	coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação
n	expoente de encruamento
Q	energia de activação para processos a quente
r	coeficiente de anisotropia
R	constante universal dos gases
s	tensão nominal
t	tempo
t_0	tempo de relaxamento
T	temperatura
v	velocidade de deslocamento das amarras
w	largura útil do provete
W	energia gerada
Λ	percurso livre médio das deslocações
α	constante que caracteriza a morfologia da microestrutura de deslocações



ε	deformação
$\dot{\varepsilon}$	velocidade de deformação
μ	módulo de elasticidade transversal
θ	taxa de encruamento
ρ	densidade de deslocações
σ	tensão
σ^x	tensão de corte
τ_0	constante que caracteriza os obstáculos ao movimento das deslocações
v^*	volume da energia de activação
v	velocidade das deslocações móveis



CAPÍTULO I

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



O aço inoxidável AISI 304 é um dos mais atractivos materiais comercialmente na indústria devido à sua excelente resistência à corrosão, boa formabilidade e elevada ductilidade. Como é do conhecimento geral, o aço inoxidável tem uma vasta utilização em vários sectores de actividade, destacando-se o da indústria alimentar. É também conhecido que a maioria dos componentes em aço inoxidável são, actualmente, produzidos por conformação plástica de chapa. Tal situação deve-se, sobretudo às elevadas cadências de produção obtidas com este processo e às excelentes qualidades dos produtos finais. No entanto, é usual na prática industrial a referência às dificuldades específicas da estampagem do aço inoxidável que conduzem a elevadas rejeições e aumento substancial do preço dos produtos. O problema fundamental a resolver durante a estampagem do aço inoxidável é o controlo do aumento da temperatura associado às elevadas velocidades de deformação.

Para melhor compreendermos o problema, apresenta-se de seguida a equação geral que relaciona a tensão com a velocidade de deformação:

$$\sigma = \sigma(\dot{\epsilon}) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^m \quad (1)$$

em que,

- σ – é a tensão de escoamento quando a velocidade de deformação plástica é $\dot{\epsilon}$;
- $\dot{\epsilon}_0$ – é uma velocidade de deformação plástica de referência para a qual a curva $\sigma(\dot{\epsilon})$ foi determinada;
- m – é o coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação.

Nos metais que exibem o efeito de Cottrell-Stokes, o valor do coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação é praticamente constante ($m = m_0$). No entanto, nos metais endurecidos por precipitação, em que se verifica a ocorrência de fenómenos de envelhecimento dinâmico por deformação, foi reconhecida por Cottrell ^[1] a importância das interacções entre os solutos e as deslocações. É por isso que o aumento da velocidade de deformação produz alterações significativas no comportamento mecânico do material. Segundo Estrin ^[2], o coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação pode, para os metais anteriormente referidos, ser determinado do seguinte modo:

$$m = \frac{d(\ln \sigma)}{d(\ln \dot{\epsilon})} \Rightarrow m = m_0 - \left(\frac{2f_0}{3\sigma} \right) X \exp(-X) \quad (2)$$

em que,

$$X = \left(\frac{\Omega}{z} \right)^{2/3} \quad (3)$$

$$z = \dot{\epsilon} \tau_0 \quad (4)$$

$$\Omega = b \Lambda \rho_m \quad (5)$$

Nestas equações, f_0 é o aumento máximo da tensão produzido pelo envelhecimento dinâmico por deformação, τ_0 é o tempo de relaxamento associado ao processo de difusão e Λ é o percurso livre médio das deslocações.

O valor τ_0 pode ser determinado através da seguinte equação:

$$\tau_0 = \left(\frac{C_1}{\pi C_0} \right)^{3/2} \frac{kTb^2}{3|W|D} \quad (6)$$

em que,

k – é a constante de Boltzman.

Esta equação mostra que τ_0 depende da temperatura T , do coeficiente de difusão dos átomos D e da energia gerada entre os solutos e as deslocações W . Além disso, τ_0 depende também da fracção volúmica de solutos C_0 e da concentração de saturação de solutos nas deslocações C_1 .

Diversos ensaios experimentais realizados no aço inoxidável AISI 304 têm aumentado rapidamente nos últimos anos, paralelamente com o aumento do número de aplicações. Por isso, o comportamento mecânico básico do aço inoxidável AISI 304 encontra-se facilmente em diversa documentação [3,4].

O aço inoxidável em estudo, sendo um aço inoxidável austenítico, é constituído por uma estrutura cúbica de faces centradas, a qual é obtida através da inclusão de elementos de liga como o níquel, manganês ou azoto. Estes aços são essencialmente não magnéticos após tratamento térmico e endurecidos somente por meio de trabalho a frio. A composição dos aços inoxidáveis austeníticos consiste no balanço entre os elementos de liga que promovem a formação de ferrite e aqueles que promovem a formação de austenite [5].

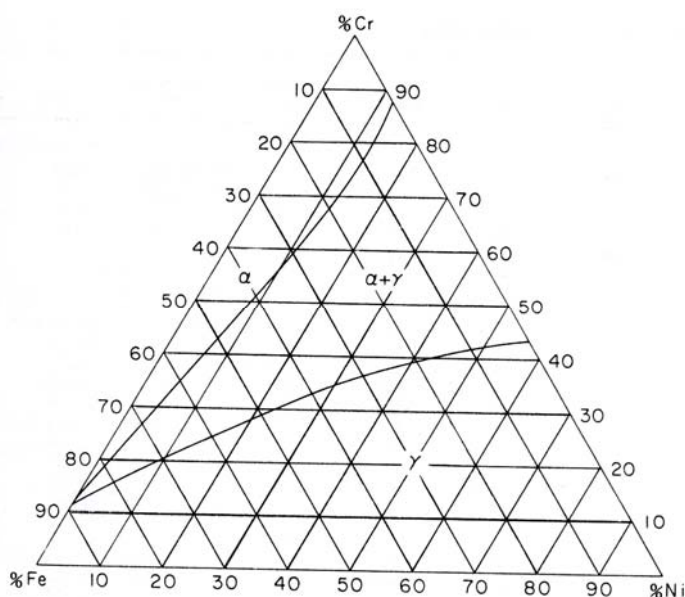


Figura 1. O sistema ferro-crômio-níquel a 1100°C dos aços inoxidáveis austeníticos.



A figura 1 ilustra como os aços inoxidáveis austeníticos podem ser definidos em termos de sistema de liga ternário ferro-crômio-níquel ^[6], mostrando o equilíbrio do diagrama de fases ferro-crômio-níquel à temperatura de estabilidade máxima da austenite, uma vez que abaixo desta temperatura começa a formar-se alguma ferrite. Deste modo, para aumentar o crômio acima de 18%, por exemplo, é necessário aumentar o níquel, pois caso contrário pode formar-se quantidades significativas de ferrite.

O aço inoxidável AISI 304 apresenta, além de uma baixa energia de falha de empilhamento, uma elevada densidade de defeitos que dificultam o movimento das deslocações. As falhas de empilhamento podem ser produzidas nos metais em geral durante a deformação plástica. As diferenças de comportamento dos metais são essencialmente devido às diferenças nas falhas de empilhamento, onde a região de empilhamento tem uma energia mais elevada que região da malha cristalina. Desta forma, as falhas de empilhamento do metal é uma extensão da deslocação em volta duma região fronteira muito pequena definida por deslocações parciais ^[6]. Se as deslocações parciais estiverem muito próximas, estas tendem a repelir-se umas às outras, embora seja contrabalançado por uma tensão existente na zona de falha de empilhamento que tende a puxar todas elas. Quanto mais baixa for a energia de falha de empilhamento, maior será a separação entre as deslocações parciais e mais extensa será a falha de empilhamento.

As falhas de empilhamento influenciam a deformação plástica de determinadas formas. Os metais com uma baixa energia de falha de empilhamento encruam mais rapidamente e apresentam uma temperatura diferente, dependendo da tensão a que estão sujeitos, que os metais com uma elevada energia de falha de empilhamento. Os metais com uma elevada energia de falha de empilhamento têm deformações das malhas cristalinas com deslocações entrelaçadas, enquanto que os metais com baixa energia possuem deformações das malhas com arranjos lineares de deslocações.

Ao aumento da resistência do cristal à deformação plástica durante a sollicitação designa-se por encruamento. O encruamento é, assim, atribuído à interacção das deslocações com outras deslocações e com outros obstáculos ao seu movimento dentro da malha cristalina. A deformação plástica produz um aumento significativo de deslocações, que por virtude da sua interacção resulta num estado elevado de tensões internas. O encruamento é um processo industrial importante que é utilizado para endurecer metais ou ligas que não respondem a tratamentos térmicos. O encruamento pode ser minimizado a partir do declive da curva tensão-deformação ou através do aumento da temperatura. O encruamento com um valor elevado implica uma obstrução mútua de deslocações sobre sistemas que se intersectam, a qual pode ser devido à interacção de campos de tensões provocados pelas deslocações, interacções que produzem encadeamentos de deslocações e interpenetração de um sistema de escorregamento por outro.

Quando estes aços são aquecidos durante um grande período de tempo numa gama de temperaturas entre 425°C e 870°C pode ocorrer precipitação nas fronteiras de grão. Assim, no caso de haver precipitação de crômio nas fronteiras de grão, toda a área adjacente fica repleta de crômio e, se a precipitação for contínua, o aço torna-se susceptível à corrosão intergranular. Além disso, também pode ocorrer precipitação de fases intermetálicas que promove o aumento da susceptibilidade dos aços à corrosão e fragilidade. Para corrigir estas ocorrências, estes aços são sujeitos a um tratamento térmico.

Outro tipo de ocorrência nos aços inoxidáveis austeníticos é a formação de martensite durante o arrefecimento abaixo da temperatura ambiente ou em resposta a um trabalho a frio. Eichelman e Hull ^[7] estabeleceram a seguinte equação para a temperatura de solidificação M_s :



$$M_s [^{\circ}\text{F}] = 75 (14,6\text{-Cr}) + 110 (8,9\text{-Ni}) + 60 (1,33\text{-Mn}) + 50 (0,47\text{-Si}) + 3000 [0,068 (C+N)] \quad (7)$$

Como podemos verificar, os elementos ligados como o cromo e níquel têm um efeito moderado sobre a temperatura de solidificação quando comparados com o forte efeito do carbono e azoto. Assim, quando os resíduos de azoto contidos no aço combinam com o carbono, os mesmos têm um efeito acentuado na estabilização da austenite relativamente à formação de martensite. Se a precipitação ocorrer nas fronteiras de grão da austenite, tanto o carbono como o cromo são removidos da austenite adjacente, atingindo localmente a temperatura de solidificação, e a martensite forma-se ao longo das fronteiras de grão ^[8].

A formação de martensite induzida por deformação é outra característica única dos aços inoxidáveis austeníticos. Angel ^[9] definiu a temperatura M_D da seguinte forma:

$$M_D [^{\circ}\text{C}] = 413 - 462 (C+N) - 9,2 (Si) - 8,1 (Mn) - 13,7 (Cr) - 9,5 (Ni) - 18,5 (Mo) \quad (8)$$

A martensite induzida por deformação forma-se a elevadas temperaturas e o parâmetro M_D , corresponde à temperatura mais elevada que a martensite forma sob determinadas condições de deformação, é usado para caracterizar a estabilidade da austenite relativamente à deformação. Contudo, a martensite induzida por deformação aumenta significativamente a resistência gerada pelo trabalho a frio e, por isso, alguns aços inoxidáveis são concebidos de forma a terem pequenas quantidades de cromo e níquel em ordem para explorar este mecanismo de resistência. A extensão da transformação da austenite em martensite induzida por deformação depende da temperatura e deformação, bem como dos elementos constituintes na composição dos aços ^[10]. As investigações desenvolvidas por Angel, Huang, Hecker e Olson ^[9,11,12,13] mostram o efeito da temperatura e deformação na formação da martensite induzida por deformação no aço inoxidável AISI 304. Grandes quantidades de martensite são formadas a baixas deformações durante temperaturas de deformação igualmente baixas, enquanto à temperatura ambiente a transformação em martensite induzida por deformação torna-se praticamente desprezível ^[14].

Alguns investigadores focaram os efeitos da velocidade de deformação no comportamento do material durante a deformação plástica a baixas velocidades de deformação. Por exemplo, Semiatin e Holbrook ^[15] analisaram o comportamento plástico do aço inoxidável AISI 304L quando sujeito a uma deformação segundo compressão e torção uniaxiais a velocidades de deformação que vão desde 10^{-4} a 10^{-1} s⁻¹ sob uma gama variada de temperaturas. Venugopal ^[16] e Sundaraman ^[17] estudaram a formabilidade e microestrutura deste material a baixas velocidades.

Kanni Raj e Padmanabhan ^[18] efectuaram um estudo que visa prognosticar a formabilidade do aço inoxidável a partir dum modelo já existente ^[19]. Como a formabilidade dos metais está relacionada com os processos físicos envolvidos na deformação plástica, foi necessário criar condições de deformação adequadas com o intuito de saber quais os parâmetros mais importantes associados a cargas uniaxiais. Dois deles são a velocidade de deformação e a mudança da direcção de deformação, os quais podem alterar as propriedades mecânicas do material ao nível macroscópico. Num aço de baixo teor de carbono os aspectos estruturais e texturais também estão envolvidos no comportamento mecânico dos metais quando sujeitos a condições de trabalho a frio ^[20].



Do ponto de vista estrutural e para níveis de deformação moderados, a deformação e o encruamento do material são obtidos através de um único parâmetro – a densidade de deslocações ^[20,21,22]. O encruamento resulta da interação entre o movimento de deslocações e obstáculos, onde as interações encontram-se, pelo menos em parte, termicamente activadas ^[23]. No entanto, o encruamento é pouco sensível às condições de deformação e propriedades do material ^[24]. Além disso, enquanto que a anisotropia é somente uma questão de textura, a mudança da orientação da deformação envolve características estruturais e texturais. Para o metal ensaiado, constatou que o amaciamento térmico era muitas vezes favorecido devido às condições de ensaio, permitindo a possibilidade de fractura prematura no material. O aparecimento de regiões de deformação localizada, indica a existência de uma instabilidade estrutural do material durante a deformação.

Moverare ^[25] realizou um estudo sobre as mudanças na orientação da deformação no comportamento mecânico de um aço inoxidável com fracções de volume comparáveis de austenite e ferrite. A fase austenítica, com uma baixa energia de falha de empilhamento, desenvolvia uma estrutura de deslocações planar durante a deformação. A fase ferrítica, possuindo uma elevada energia de falha de empilhamento, propiciava ao cruzamento de planos de deslizamento durante a deformação. As curvas tensão-deformação da deformação do material a 0° em relação à direcção de laminagem mostraram uma deformação e encruamento similar à deformação com cargas uniaxiais. Quando o material era deformado a 45° e 90° em relação à direcção de laminagem, evidenciaram uma maior deformação e um encruamento menor quando comparado com a deformação com cargas uniaxiais.

Apesar do desenvolvimento de diversos trabalhos, com o aumento da variedade de métodos de fabricação e ambientes adversos na utilização deste material na indústria, mais informação é necessária sobre o comportamento mecânico do aço inoxidável AISI 304. Assim, no presente trabalho especial atenção foi dedicada ao estudo da influência da velocidade de deformação no comportamento mecânico do aço inoxidável AISI 304 segundo diferentes orientações no plano da chapa relativamente à direcção de laminagem. Além disso, para cada velocidade de deformação, procedeu-se à análise da formação de martensite após ruptura do material e verificou-se qual o aumento da temperatura resultante do encruamento do material. Como o comportamento deste material durante a deformação plástica é afectado obviamente pela microestrutura, velocidade de deformação e temperatura, a análise dos resultados foi efectuada à luz da teoria de encruamento microestrutural e efeito do amaciamento térmico.



CAPÍTULO II

MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS



O material utilizado no presente trabalho consistiu numa chapa de aço inoxidável AISI 304 com 0,7mm de espessura.

A composição química do material encontra-se ilustrada na tabela 1 [26,27]:

C	Cr	Mn	Ni	P	S	Si	N	Fe
0,055	18,200	1,800	8,100	0,031	0,001	0,357	0,065	71,391

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável AISI 304 (%)

Da chapa, foram maquinados provetes ISO 50 com um comprimento útil de 75mm e uma largura de 12,5mm. Os provetes foram cortados segundo diferentes orientações no plano da chapa relativamente à direcção de laminagem (0°, 45° e 90°) de modo a permitir a análise da anisotropia do material (figura 2).



Figura 2. Provetes de aço inoxidável AISI 304 deformados a 0°, 45° e 90° em relação à direcção de laminagem até à ruptura.



Figura 3. Máquina de ensaios de tracção SHIMADZU.



Os ensaios de tracção uniaxial foram realizados numa máquina universal de ensaios mecânicos SHIMADZU (figura 3), tendo as deformações plásticas do material sido medidas com recurso a extensometria (figura 4).



Figura 4. Extensómetro da máquina de ensaios de tracção SHIMADZU.

A fim de analisar o efeito da velocidade de deformação no comportamento mecânico do aço inoxidável AISI 304, seleccionaram-se as seguintes velocidades de deslocamento das amarras: 5mm/min, 50mm/min e 500mm/min.

Atendendo a que ^[28]

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \Rightarrow \dot{\epsilon} = \frac{d[\ln(L/L_0)]}{dt} \quad (9)$$

em que L_0 e L são respectivamente o comprimento inicial e final de referência dos provetes, obtém-se para uma velocidade de deslocamento das amarras constante a seguinte expressão:

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} \Rightarrow \dot{\epsilon} = \frac{v}{L} \quad (10)$$

Ou seja, as velocidades de deformação plástica realizadas foram respectivamente $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ para a velocidade $v = 5 \text{ mm/min}$, $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ para a velocidade $v = 50 \text{ mm/min}$ e $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ para a velocidade $v = 500 \text{ mm/min}$.

Com o objectivo de analisar a possibilidade de formação de martensite numa chapa de aço inoxidável AISI 304 quando sujeita a elevadas velocidades de deformação, foram feitas observações por microscopia óptica num microscópio modelo Axiophot da marca Zeiss, tendo-se obtido as fotos desejadas através do programa Olympus DP-Soft.



As amostras utilizadas nestas observações foram preparadas em resina quente, do tipo Durofast e da marca Struers, com o auxílio duma prensa modelo Prontopress-2 da marca Struers. As amostras resultantes foram sujeitas a desbaste mecânico com lixas de carboneto de silício sucessivamente mais finas a 300 r.p.m. por meio do equipamento Rotopol-1 da marca Struers. De seguida, foram submetidas a um processo de polimento com diamante de grão 3 e $1\mu\text{m}$ respectivamente a 150 r.p.m., tendo-se utilizado um lubrificante com o intuito de otimizar o processo. Por fim, para efectuar as observações as amostras foram sujeitas a um produto de ataque Kalling's n.º 1 durante 2 minutos.

A medição de temperatura dos provetes durante os ensaios de tracção uniaxial foi efectuada com recurso à técnica de termografia ^[29]. Segundo esta técnica, o espectro infravermelho é transformado num espectro visual em tempo real, sendo a respectiva imagem imprimida num termograma. Os ensaios foram realizados num sistema de detecção e medição de radiação infravermelha AGEMA 550 ELITE com objectivas de $20^\circ \times 20^\circ$ (figura 5).



Figura 5. Equipamento de termografia por infravermelho.

A recolha de imagens foi efectuada com uma câmara localizada a 80cm do provete, considerando um factor de emissividade igual a 0,90. O tratamento das imagens foi realizado com recurso ao software IRWIN RESEARCH 2,01. Foram efectuadas 50 medições por segundo para as velocidades de deformação $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ e uma por segundo para a velocidade de deformação $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.



CAPÍTULO III

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. ESTUDO DA ANISOTROPIA PLÁSTICA DO MATERIAL

A caracterização da anisotropia plástica do aço inoxidável AISI 304 foi efectuada com recurso a ensaios de tracção realizados a 0°, 45° e 90° relativamente à direcção de laminagem. A figura 6 mostra as respectivas curvas tensão real – deformação real obtidas para a velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

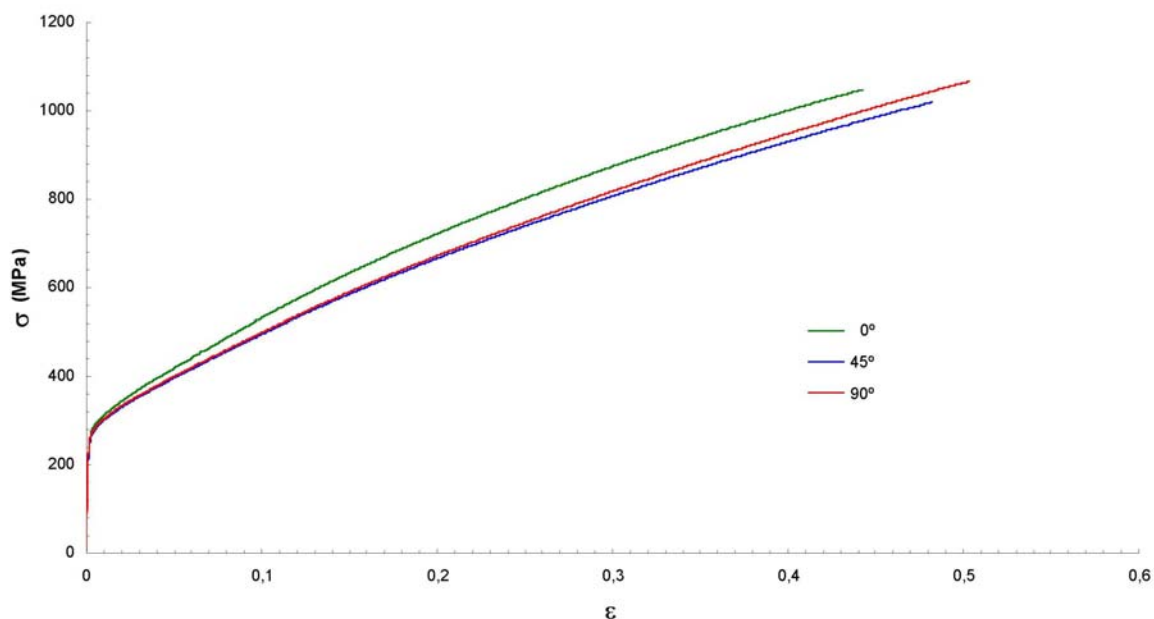


Figura 6. Curva tensão-deformação do aço inoxidável AISI 304 deformado a 0°, 45° e 90° em relação à direcção de laminagem à velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Pode verificar-se na figura 6 que para valores médios de deformação (/20%) a taxa de encruamento para os ensaios realizados a 90° e 45° relativamente à direcção de laminagem aumenta consideravelmente, dando origem a um maior alongamento do material nestas condições.

Na tabela 2 encontram-se indicados os valores correspondentes de tensão limite de elasticidade, tensão de ruptura, alongamento uniforme e coeficiente de anisotropia r .

Orientação dos provetes em relação à direcção de laminagem	Tensão limite de elasticidade [MPa]	Tensão de ruptura [Mpa]	Alongamento uniforme	Coefficiente de anisotropia
0°	279,3	673,1	0,56	0,92
45°	268,9	629,5	0,62	1,30
90°	272,6	645,1	0,65	0,79

Tabela 2. Propriedades obtidas após a deformação do aço inoxidável AISI 304 a 0°, 45° e 90° em relação à direcção de laminagem à velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.



Os valores de r foram determinados a partir da medição da inclinação das curvas representativas da razão entre as deformações segundo a largura e comprimento dos provetes (figura 7):

$$s = \frac{d\varepsilon_w}{d\varepsilon_l} \quad (11)$$

em que

ε_w – é a deformação plástica real segundo a largura do provete;

ε_l – é a deformação plástica real segundo comprimento do provete.

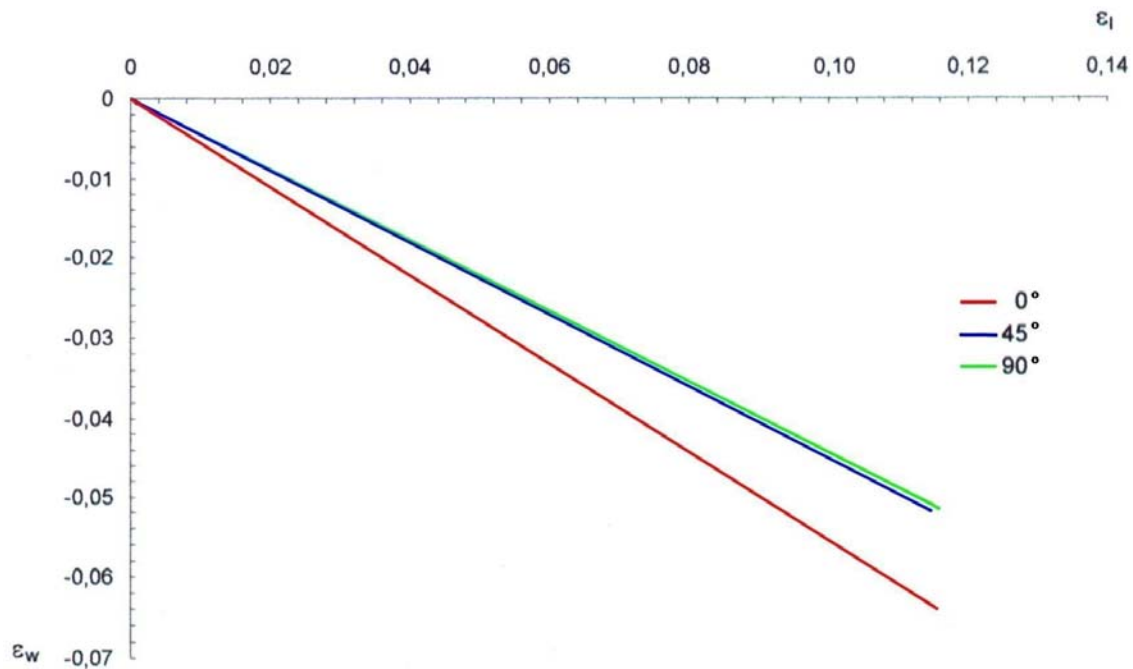


Figura 7. Relação entre a deformação plástica segundo a largura e comprimento do provete de aço inoxidável AISI 304 deformado a 0°, 45° e 90° relativamente à direcção de laminagem à velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Assumindo que a deformação plástica ocorre sem alteração do volume, o valor de r é dado por:

$$r = \frac{s}{1 + s} \quad (12)$$

A tabela 3 ilustra as propriedades plásticas obtidas durante os testes realizados a uma velocidade de deformação $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$.



Orientação dos provetes em relação à direcção de laminagem	Tensão limite de elasticidade [MPa]	Tensão de ruptura [Mpa]	Alongamento uniforme	Coefficiente de anisotropia
0°	317,8	642,1	0,42	0,93
45°	310,7	604,0	0,44	1,30
90°	311,9	616,2	0,45	0,80

Tabela 3. Propriedades obtidas após a deformação do aço inoxidável AISI 304 a 0°, 45° e 90° em relação à direcção de laminagem à velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Como se pode constatar, ao analisar os valores das tabelas 2 e 3 e apesar de os outros parâmetros serem afectados, a velocidade de deformação não influencia a anisotropia plástica do aço inoxidável AISI 304.

2. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO NO ALONGAMENTO UNIFORME

A análise da velocidade de deformação no alongamento uniforme do material, foi realizada para as três orientações de tracção anteriormente referidas. Para cada orientação, os provetes foram solicitados às velocidades de deformação iguais a $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Os resultados obtidos encontram-se nas figuras 8, 9 e 10.

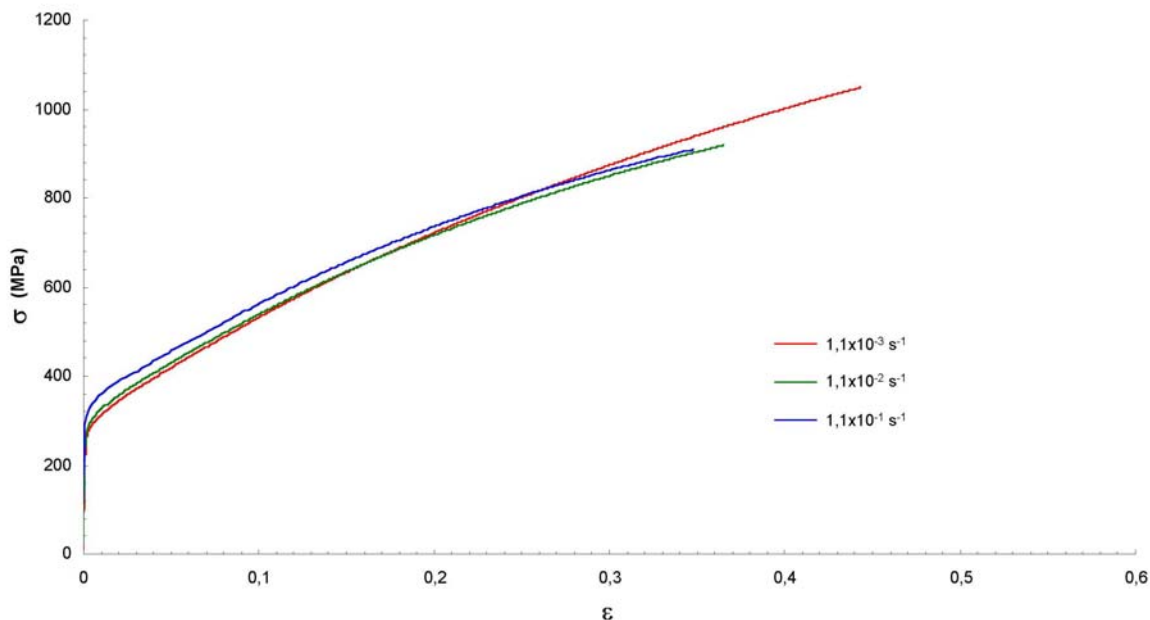


Figura 8. Curva tensão-deformação do aço inoxidável AISI 304 deformado a 0° em relação à direcção de laminagem segundo diferentes velocidades de deformação.

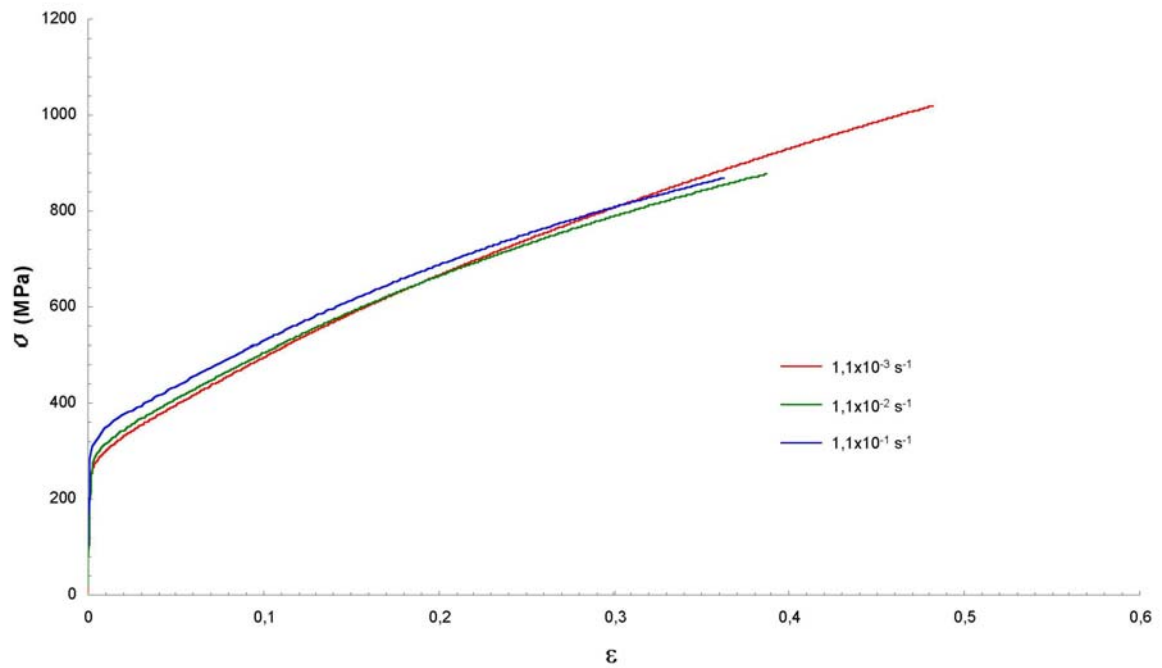


Figura 9. Curva tensão-deformação do aço inoxidável AISI 304 deformado a 45° em relação à direcção de laminagem segundo diferentes velocidades de deformação.

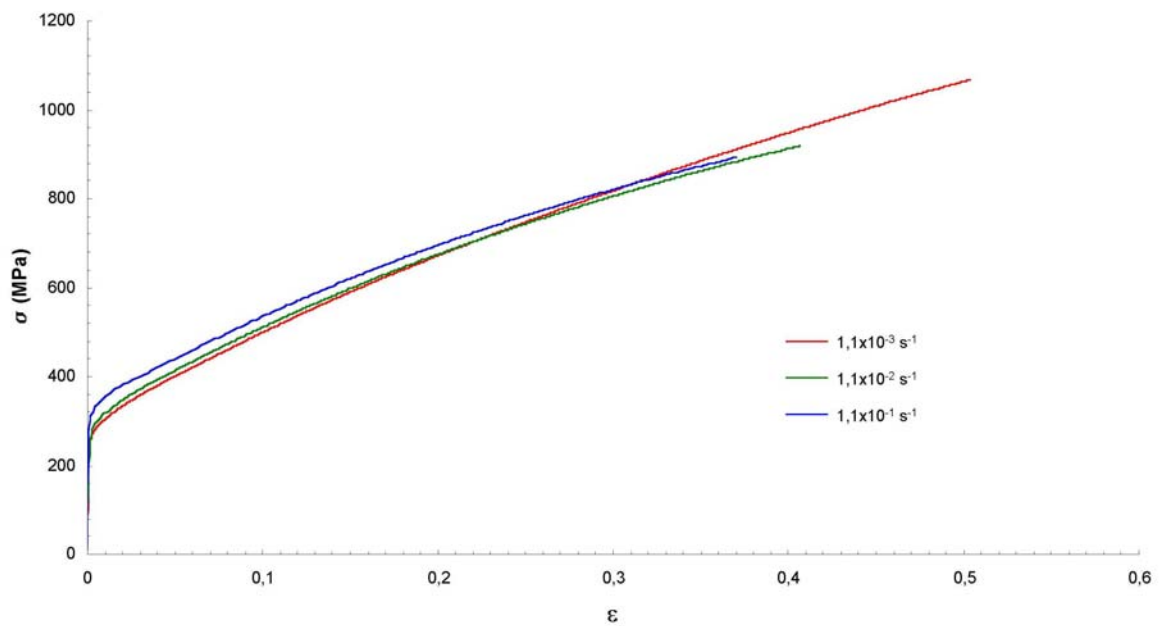


Figura 10. Curva tensão-deformação do aço inoxidável AISI 304 deformado a 90° em relação à direcção de laminagem segundo diferentes velocidades de deformação.

De um modo geral, o aumento da velocidade de deformação conduz à diminuição do alongamento uniforme e, conseqüentemente do fluxo de tensão.



Quando se aumenta a velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ para $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ verifica-se uma redução da formabilidade de cerca de 33%, 40% e 45% para os ensaios realizados respectivamente a 0° , 45° e 90° relativamente à direcção de laminagem.

Além disso, um fenómeno comum aos três ensaios é a existência de um cruzamento de curvas após um valor de deformação aproximadamente igual a 20% entre as velocidades de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ e $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-2}$, e 30% entre velocidades de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ e $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Convém salientar que este comportamento foi recentemente investigado para as ligas de alumínio comercial ^[30, 31], tendo sido atribuído à evolução da textura cristalográfica durante a tracção uniaxial.

Por forma a compreender mais em profundidade a redução de formabilidade do material e do cruzamento das curvas $\sigma = f(\epsilon)$, procedeu-se à determinação do coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação m através da seguinte equação:

$$m = \frac{\ln(\sigma_a/\sigma_b)}{\ln(\dot{\epsilon}_a/\dot{\epsilon}_b)} \quad (13)$$

em que

σ_a e σ_b – são as tensões de escoamento medidas para o mesmo valor de deformação e para duas velocidades de deformação investigadas.

As figuras 11 e 12 mostram a evolução do valor de m com a deformação.

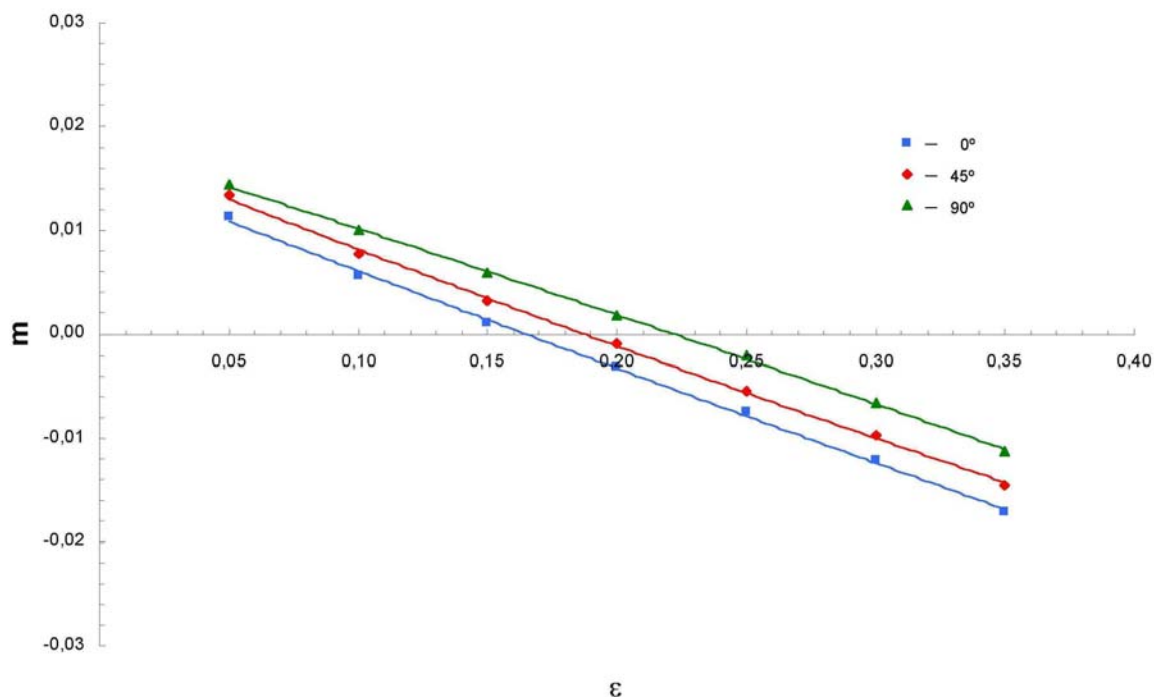


Figura 11. Coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação do aço inoxidável AISI 304 a 0° , 45° e 90° em relação à direcção de laminagem segundo velocidades de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ e $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ respectivamente.

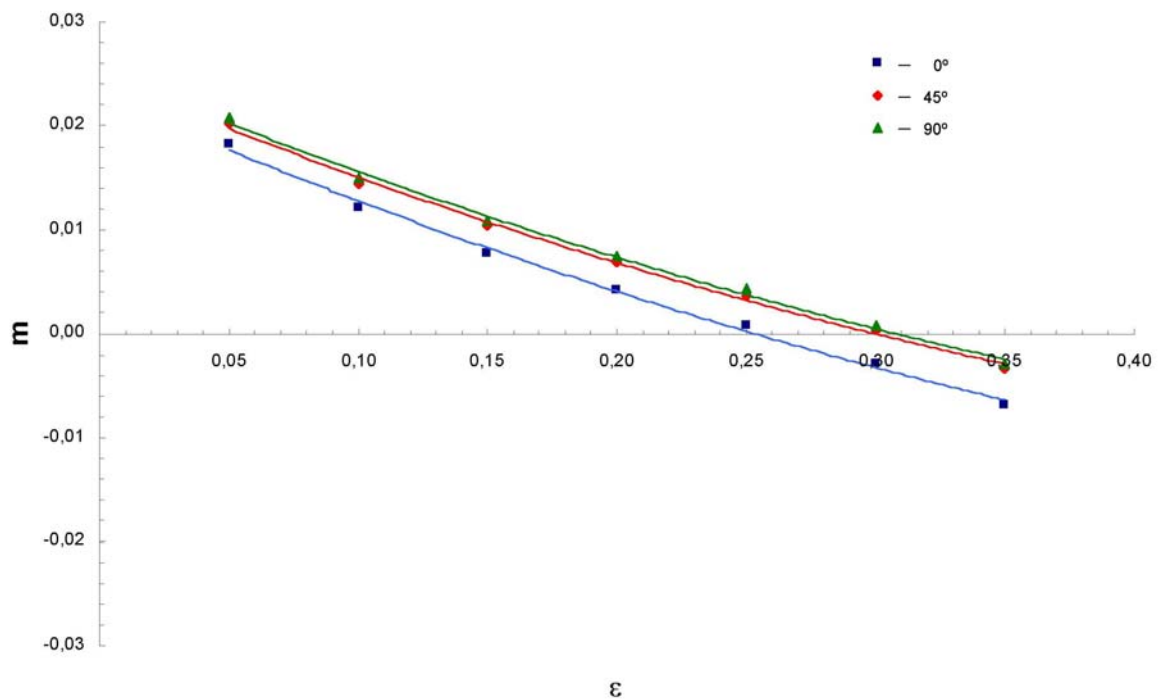


Figura 12. Coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação do aço inoxidável AISI 304 a 0°, 45° e 90° em relação à direcção de laminagem segundo velocidades de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ e $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ respectivamente.

Pode constatar-se que, para as velocidades de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ e $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-2}$, o valor de m varia entre 0,015 e $-0,015$ e para valores moderados de deformação ($\epsilon_1 \approx 20\%$) o valor de m é aproximadamente igual a zero. Em relação às velocidades de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ e $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-2}$, o valor de m varia entre 0,020 e $-0,010$ e para valores moderados de deformação ($\epsilon_2 \approx 30\%$) o valor de m também é quase igual a zero.

Durante a tracção uniaxial, a extensão uniforme pode ser determinada recorrendo à condição de Considère:

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = d\epsilon \Rightarrow \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma \quad (14)$$

Assumindo a lei de encruamento do tipo Holloman com integração da sensibilidade à velocidade de deformação ^[32]:

$$\sigma = K \epsilon^n \dot{\epsilon}^m \quad (15)$$

onde,

n – é o expoente de encruamento;

m – é o coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação;

K – é o coeficiente de resistência à deformação.



Desta forma, a condição de Considère toma a forma:

$$\frac{n}{\varepsilon} + \frac{m}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{d\varepsilon} = 1 \quad (16)$$

Para um ensaio de tracção realizado a uma velocidade de deformação constante, a extensão uniforme é dada por:

$$\varepsilon = n \quad (17)$$

Utilizando a relação

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L} \quad (18)$$

e

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{L} \quad (19)$$

em que,

L – é o comprimento útil do provete;
v – é a velocidade de deslocamento das amarras.

obté-m-se a seguinte equação:

$$\frac{d\dot{\varepsilon}}{d\varepsilon} = \frac{1}{L} \frac{dv}{d\varepsilon} - \frac{v}{L} \quad (20)$$

Para uma velocidade de deslocamento das amarras constante obtém-se:

$$\varepsilon = \frac{n}{1 + m} \quad (21)$$

Pode então concluir-se que os valores de m determinados não permitem justificar a redução da extensão uniforme observada experimentalmente, já que para $\varepsilon_1 \approx 20\%$ ou $\varepsilon_2 \approx 30\%$:

$$\varepsilon = n$$



3. ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE MARTENSITE

Foram realizadas observações por microscopia óptica com o intuito de analisar eventuais alterações de fase durante o processo de deformação plástica. As figuras 13, 14 e 15 ilustram as fases presentes no material antes e após as deformações realizadas respectivamente a velocidades de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ e $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$.

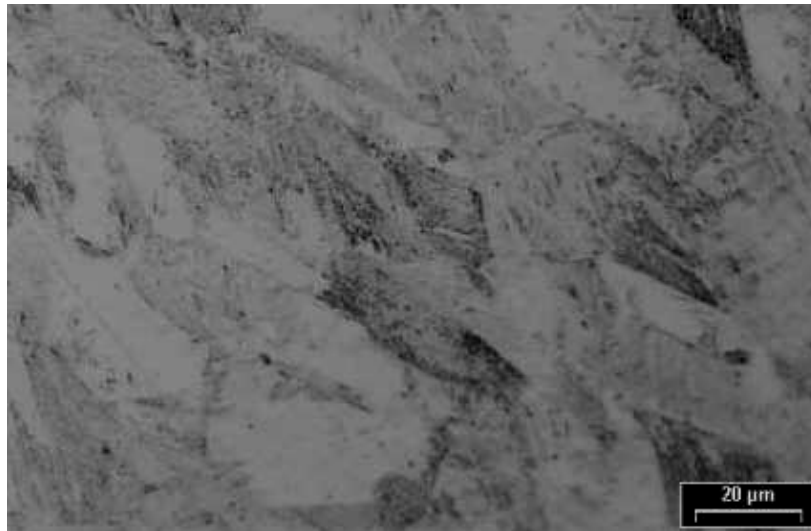


Figura 15. Fase do aço inoxidável AISI 304 observada antes da realização dos ensaios de tracção.

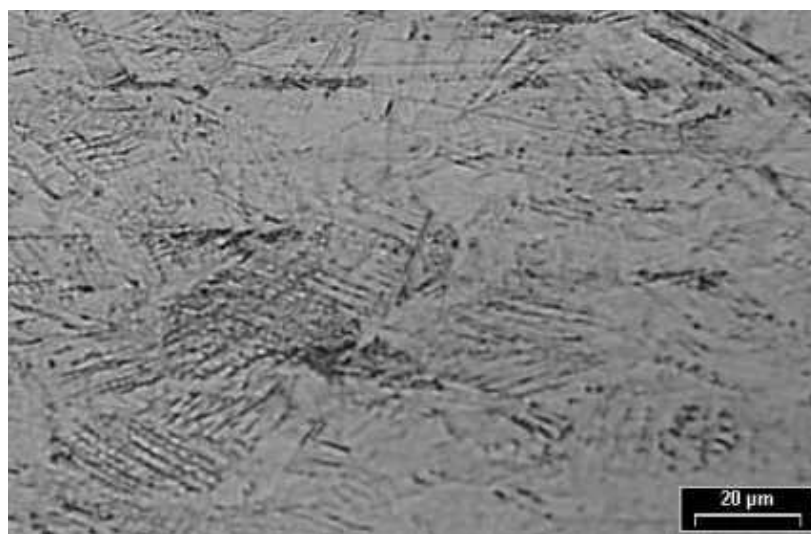


Figura 16. Fase do aço inoxidável AISI 304 depois da ruptura observada para a velocidade de deformação $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.



Figura 17. Fase do aço inoxidável AISI 304 depois da ruptura observada para a velocidade de deformação $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Como se pode constatar, tanto para a velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ como a de $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, é evidente a presença de martensite na maioria dos grãos. Estas observações mostram que o aumento de temperatura resultante do aumento da velocidade de deformação conduz a transformações de fase e, conseqüentemente, desenvolvimento de martensite. É bem sabido que as placas de martensite constituem locais de concentração de tensões diminuindo consideravelmente a plasticidade do material. Convém salientar que a temperatura de transformação de martensite depende, sobremaneira, da concentração de carbono. Nomeadamente, a temperatura ideal de formação de martensite diminui linearmente com o aumento do teor de carbono. Segundo dados experimentais [33], essa temperatura ronda os 600°C para um teor de carbono nulo e uma temperatura ambiente para um teor em carbono de 1,6%.

Pode então especular-se, dado o baixo teor de carbono do aço inoxidável em estudo, que a temperatura no interior do material será superior à da superfície dos provetes e que existiram zonas de concentração de tensões diferenciadas em função da textura cristalográfica do material. No entanto, é de todo impossível justificar a redução de formabilidade com base neste processo uma vez que a formação de martensite ocorre em ambas velocidades.

4. AUMENTO DA TEMPERATURA RESULTANTE DO AUMENTO DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO

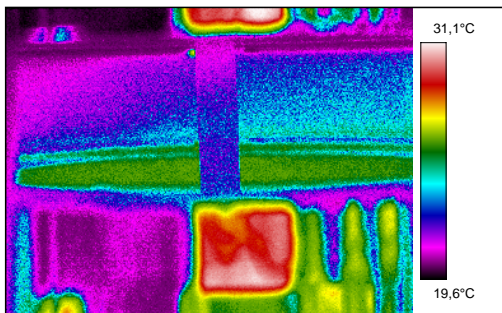
Dado que o aço inoxidável AISI 304 possui uma fraca condutividade térmica e uma elevada sensibilidade a fenómenos termicamente activados, foram realizados ensaios com o intuito de determinar eventuais alterações da temperatura dos provetes resultantes do aumento da velocidade de deformação.

Na medição de temperaturas à velocidade de deformação $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, as características do processo por termografia na realização dos ensaios foram as seguintes:

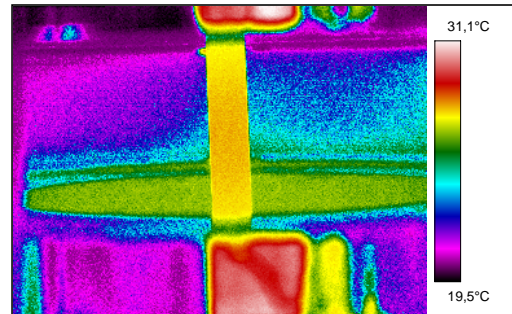
- . a velocidade de deformação é igual a $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,
- . a gama de temperaturas abrangidas pelo filtro e sensor é de -20 a 80 ($^\circ\text{C}$),
- . a velocidade de captação de imagens é de 1 img/s .



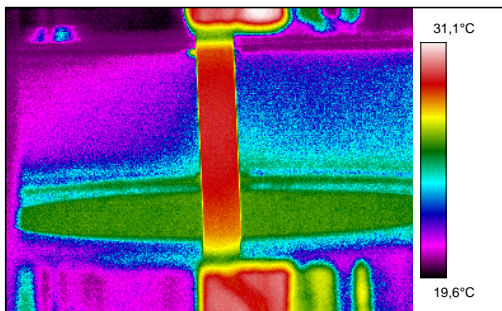
Os resultados obtidos encontram-se a seguir ilustrados:



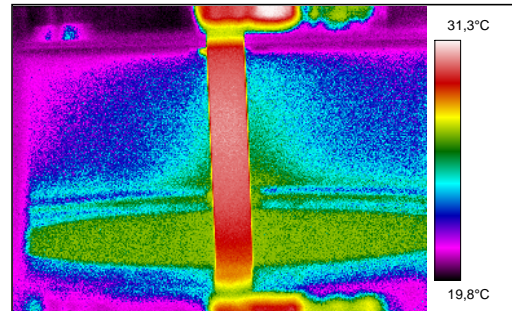
img1



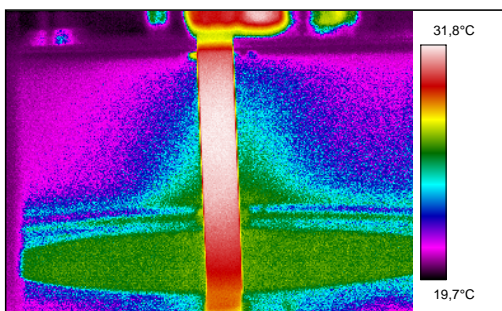
img2



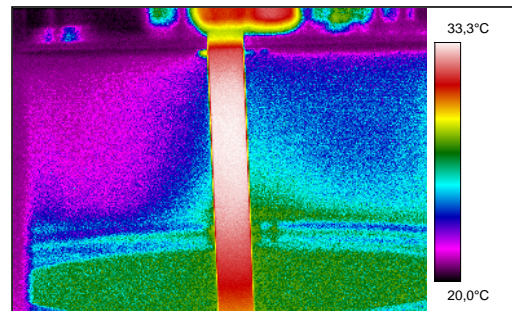
img3



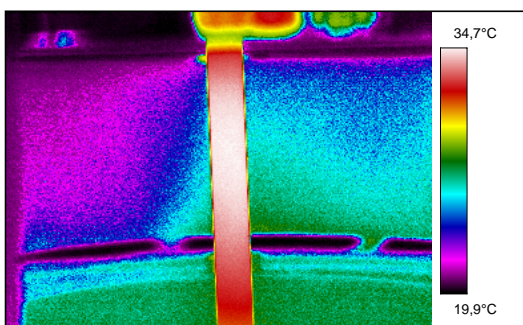
img4



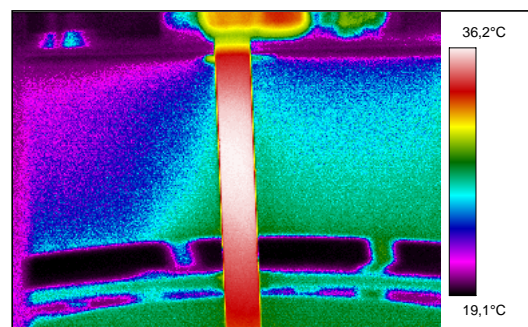
img5



img6



img7



img8

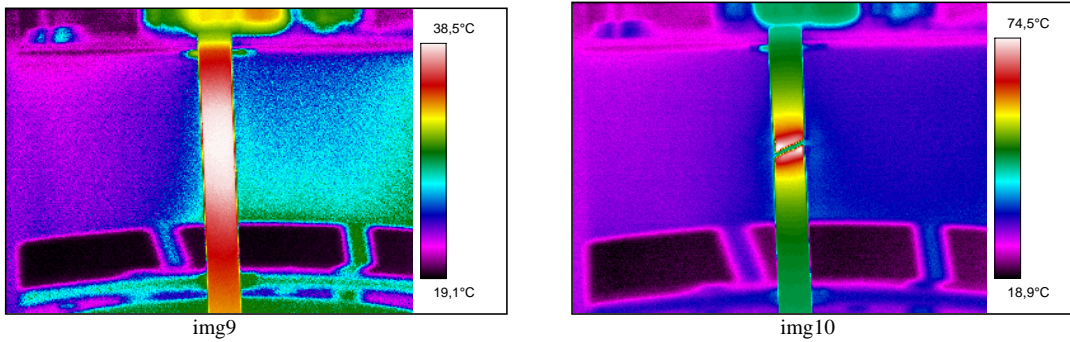


Figura 16. Imagens obtidas da medição de temperaturas pelo método de termografia durante o ensaio de tracção do aço inoxidável AISI 304 à velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Termograma (n.º)	Tempo (hora:minuto:segundo)	Temperatura (°C)
img1	11:48:19,000	23
img2	11:49:39,000	26,1
img3	11:51:03,000	28,6
img4	11:52:23,000	30,6
img5	11:53:46,000	32
img6	11:55:07,000	33,6
img7	11:56:29,000	34,9
img8	11:57:51,000	36,4
img9	11:59:13,000	38,6
img10	12:00:33,000	77,5

Tabela 4. Valores da temperatura obtidos do ensaio do aço inoxidável AISI 304 à velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

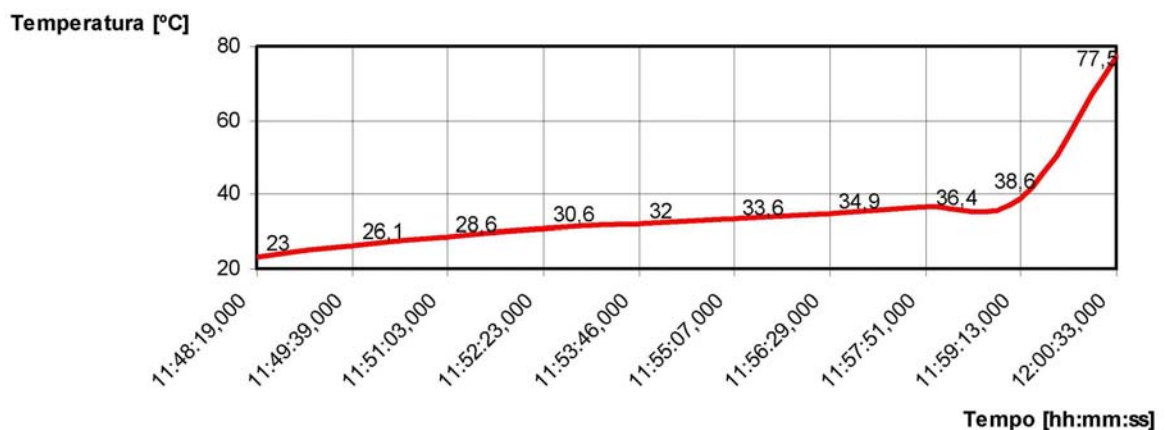


Figura 17. Evolução da temperatura do aço inoxidável AISI 304 deformado até à ruptura à velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.



Podemos constatar que à velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ a temperatura vai subindo lentamente até atingir $38,6^\circ\text{C}$ e depois sobe exponencialmente até à ruptura do provete, atingindo um pico de $77,5^\circ\text{C}$. Na figura 18 podemos ver a evolução da temperatura no momento da ruptura do provete.

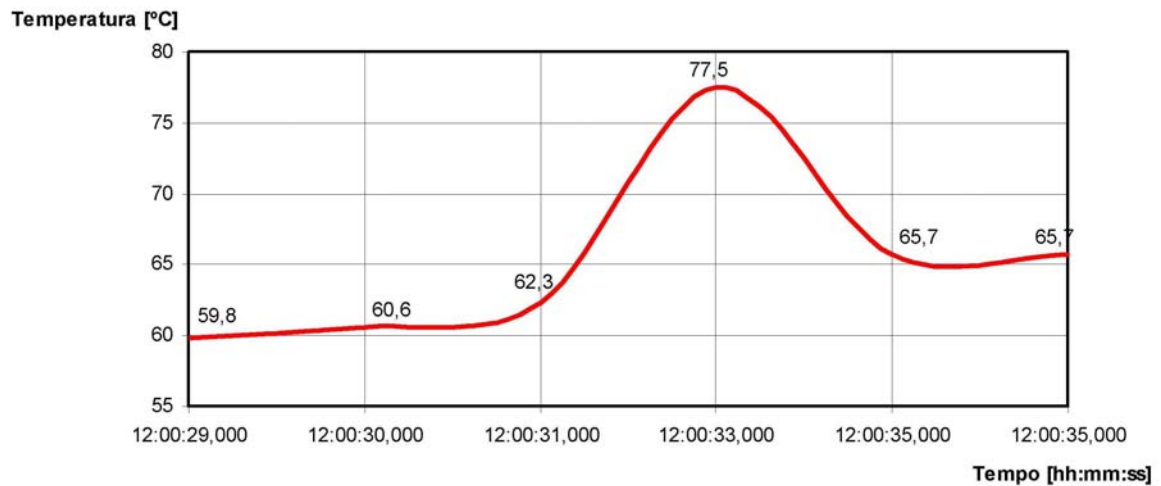
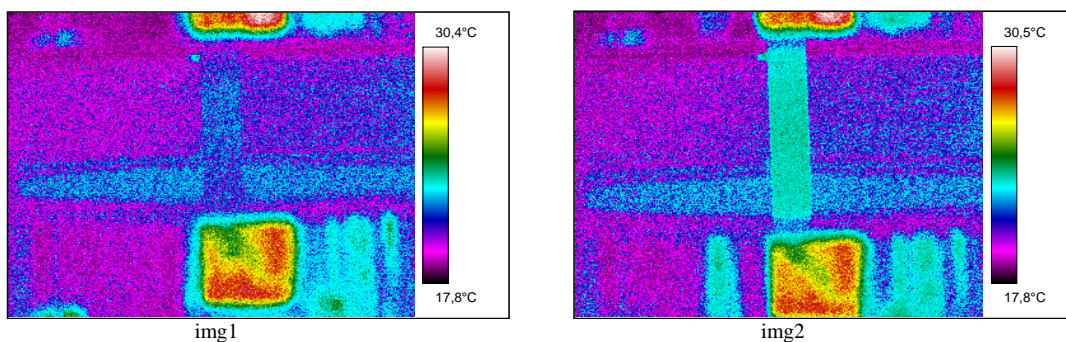


Figura 18. Evolução da temperatura do aço inoxidável AISI 304 antes, durante e após a ruptura com uma velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Para a medição de temperaturas à velocidade de deformação $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, as características do processo por termografia na realização dos ensaios foram as seguintes:

- . a velocidade de deformação é igual a $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,
- . a gama de temperaturas abrangidas pelo filtro e sensor é de 30 a $150 \text{ (}^\circ\text{C)}$,
- . a velocidade de captação de imagens é de 50 img/s.

Os resultados obtidos são apresentados de seguida:



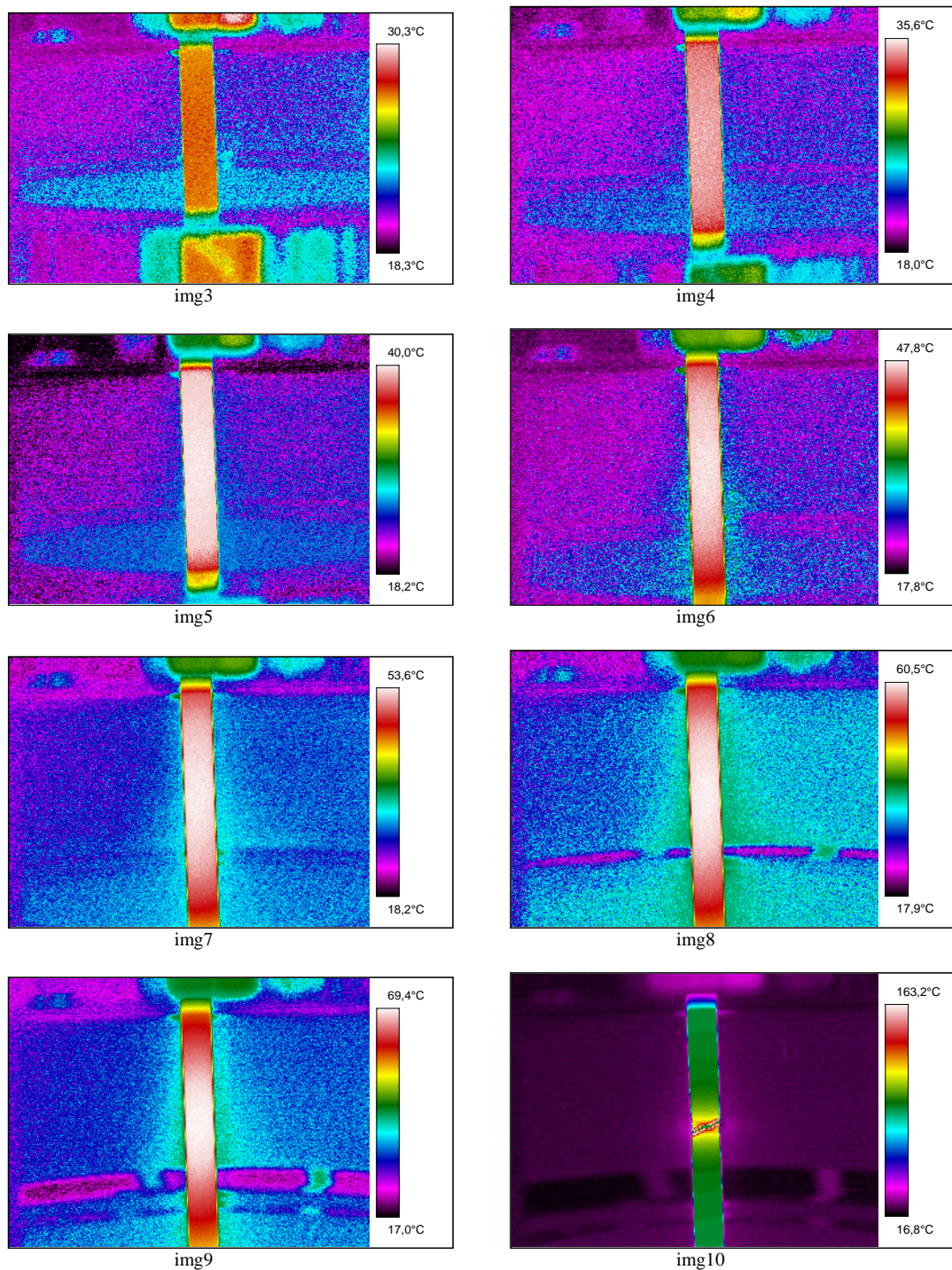


Figura 19. Imagens obtidas da medição de temperaturas pelo método de termografia durante o ensaio de tracção do aço inoxidável AISI 304 à velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.



Termograma (n.º)	Tempo (hora:minuto:segundo)	Temperatura (°C)
img1	11:32:22,404	23,7
img2	11:32:28,445	25,5
img3	11:32:34,424	29,5
img4	11:32:43,325	36,2
img5	11:32:49,304	40,3
img6	11:32:58,164	48,4
img7	11:33:04,105	54,1
img8	11:33:10,126	60,9
img9	11:33:16,106	69,8
img10	11:33:22,146	188,2

Tabela 5. Valores da temperatura obtidos do ensaio do aço inoxidável AISI 304 à velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.

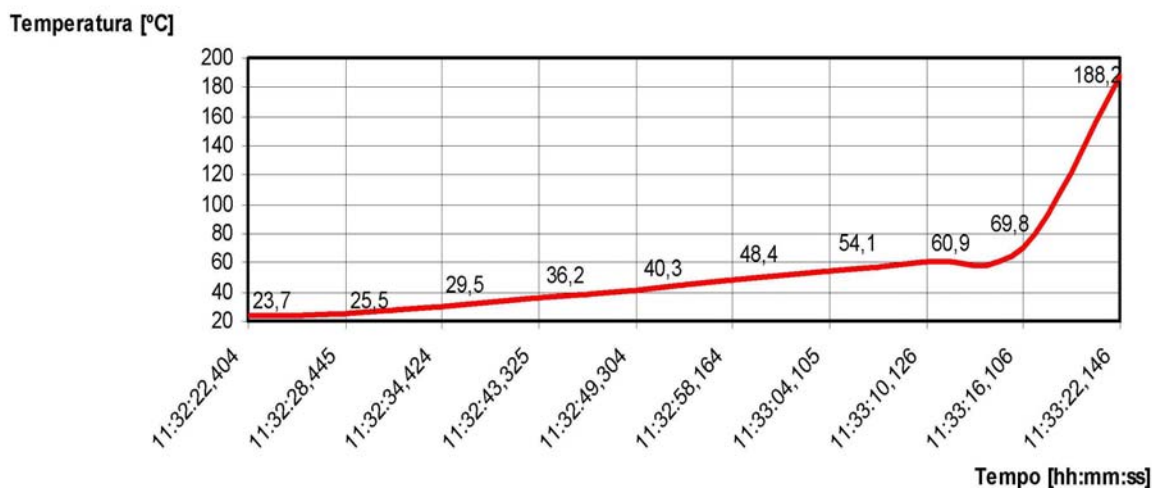


Figura 20. Evolução da temperatura do aço inoxidável AISI 304 deformado até à ruptura à velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Verificamos que para a velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ à medida que o provete é deformado a temperatura aumenta gradualmente até atingir $69,8^\circ\text{C}$, depois sobe exponencialmente até à ruptura do provete, atingindo um pico de $188,2^\circ\text{C}$. Na figura 21 podemos ver a evolução da temperatura no momento da ruptura do provete.

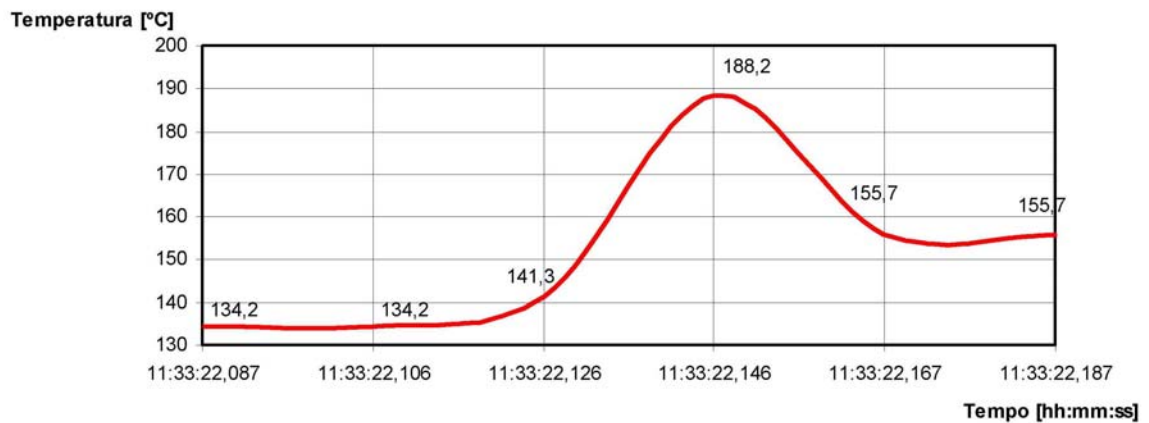
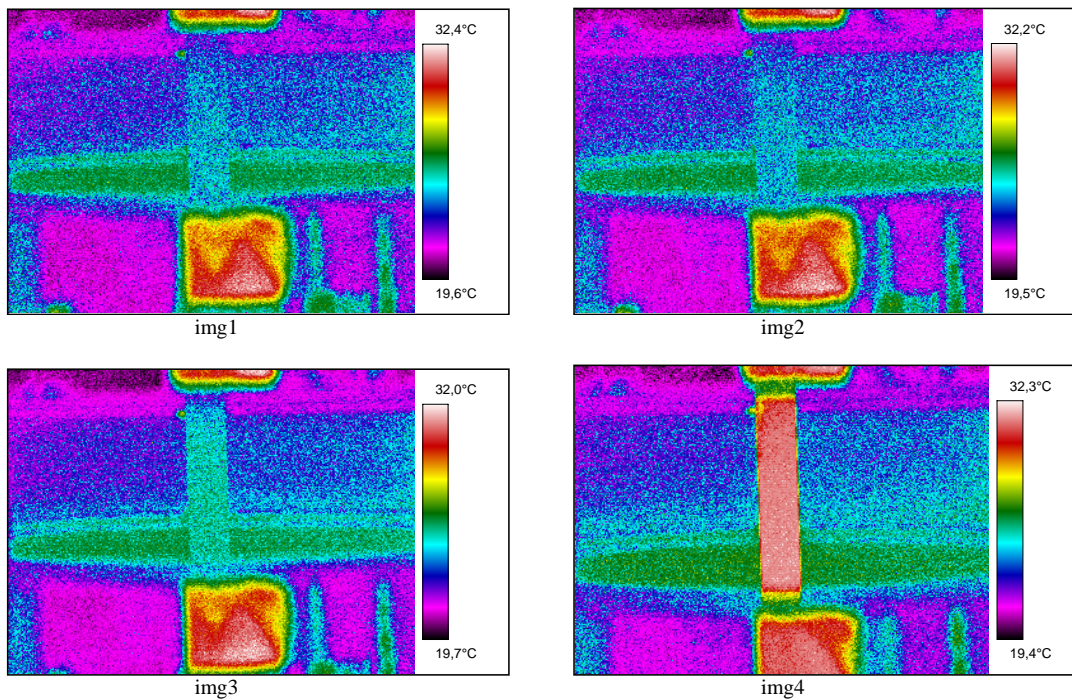


Figura 21. Evolução da temperatura do aço inoxidável AISI 304 antes, durante e após a ruptura com uma velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.

A fim de efectuar a medição de temperaturas à velocidade de deformação $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, as características do processo por termografia na realização dos ensaios foram as seguintes:

- . a velocidade de deformação é igual a $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$,
- . a gama de temperaturas abrangidas pelo filtro e sensor é de 30 a 150 (°C),
- . a velocidade de captação de imagens é de 50 img/s.

De seguida apresenta-se os resultados obtidos:



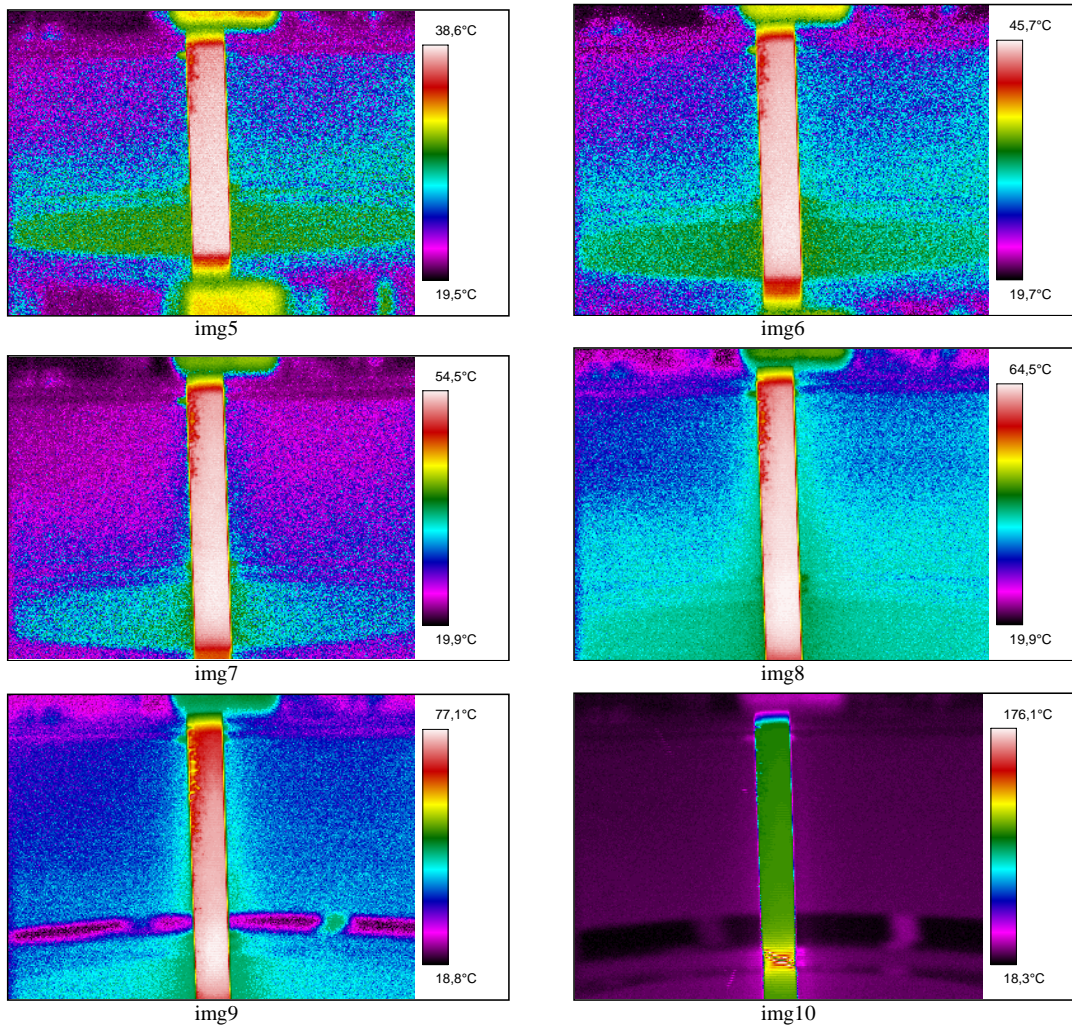


Figura 22. Imagens obtidas da medição de temperaturas pelo método de termografia durante o ensaio de tracção do aço inoxidável AISI 304 à velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Termograma (n.º)	Tempo (hora:minuto:segundo)	Temperatura (°C)
img1	12:26:58,274	26,3
img2	12:26:59,034	26,7
img3	12:26:59,815	26,8
img4	12:27:00,593	32,8
img5	12:27:01,373	39,1
img6	12:27:02,154	46,1
img7	12:27:02,934	54,8
img8	12:27:03,713	64,8
img9	12:27:04,493	77,3
img10	12:27:05,274	192,2

Tabela 6. Valores da temperatura obtidos do ensaio do aço inoxidável AISI 304 à velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$.

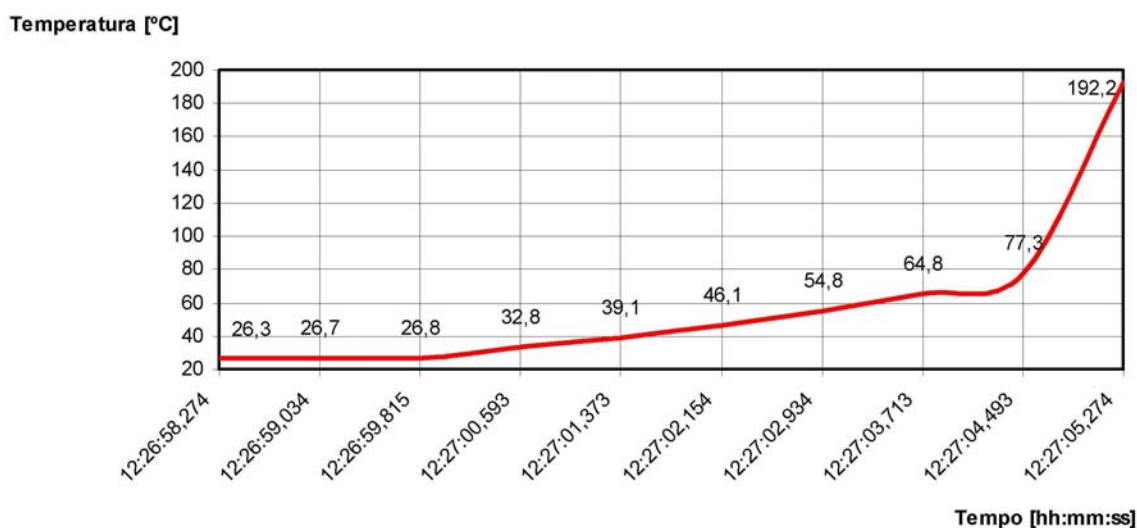


Figura 23. Evolução da temperatura do aço inoxidável AISI 304 deformado até à ruptura à velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Durante a deformação do provete à velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, a temperatura sobe gradualmente até atingir $77,3^\circ\text{C}$ e depois aumenta exponencialmente até atingir um pico de $192,2^\circ\text{C}$ aquando da ruptura do provete,.

A figura 24 mostra a evolução da temperatura no momento da ruptura do provete.

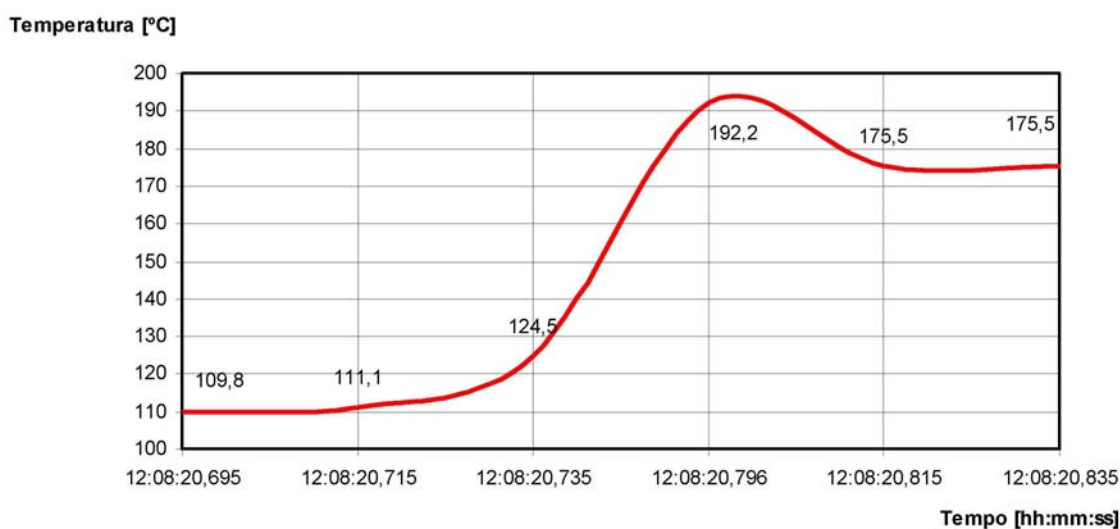


Figura 24. Evolução da temperatura do aço inoxidável AISI 304 antes, durante e após a ruptura com uma velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Assim, ficou demonstrado que o aumento da velocidade de deformação conduz inevitavelmente ao aumento da temperatura do aço inoxidável AISI 304.

A figura 25 ilustra a evolução da temperatura com a deformação para as três velocidades de deformação investigadas.

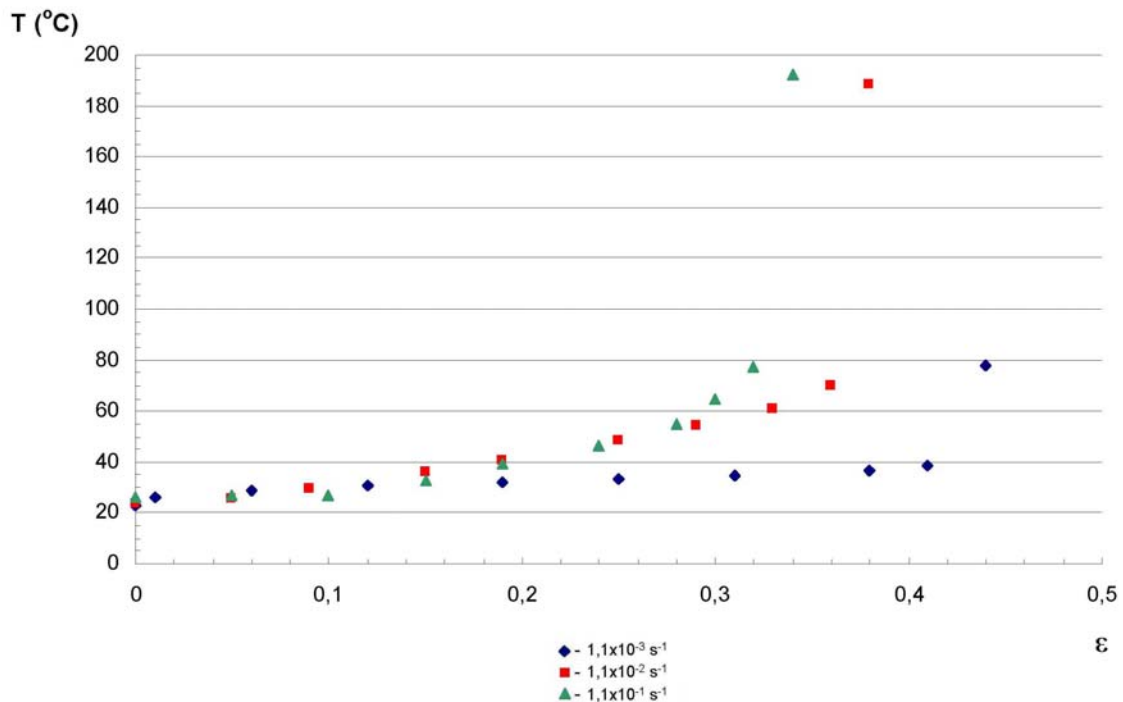


Figura 25. Evolução da temperatura com a deformação do aço inoxidável AISI 304 para as diferentes velocidades de deformação.

Como se pode verificar, para a velocidade de deformação de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ a temperatura do provete não sofreu alterações significativas, registando-se no momento da ruptura do material uma temperatura do provete de $77,5^\circ\text{C}$. Pelo contrário, para as velocidades de deformação de $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ observou-se um aumento substancial da temperatura que se situava à volta de 190°C .

Estes resultados parecem assim indicar que a redução da formabilidade do material observada, para as velocidades de deformação iguais a $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, está directamente relacionada com o amaciamento térmico do material.

5. EFEITO DO AMACIAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL

Assim, para o aço inoxidável AISI 304 dois aspectos importantes devem ser salientados tendo em conta a análise efectuada:

- a partir de um determinado valor crítico, a velocidade de deformação conduz a uma significativa diminuição do expoente de encruamento mesmo para valores de deformação moderados;
- a formabilidade do material não pode ser analisada simplesmente com base na relação entre o expoente de encruamento e a velocidade de deformação.

O expoente de encruamento pode ser minimizado a partir do declive da curva tensão-deformação ou através do aumento da temperatura. É bem conhecido que o aço inoxidável AISI 304 possui uma baixa condutividade térmica em contrapartida com um elevado coeficiente de sensibilidade térmica.



Consequentemente, a elevadas velocidades o amaciamento térmico pode ocorrer com bastante facilidade. Este fenómeno também é constatado mesmo à temperatura ambiente, a qual propicia níveis de tensão elevados. Este aquecimento proporciona desta forma que haja uma drástica redução do alongamento uniforme e apresenta um comportamento característico no sentido de as mesmas cruzarem entre si, quando se compara entre as várias velocidades de deformação e segundo os diferentes ângulos em relação à direcção de laminagem. Além disso, o aço inoxidável AISI 304 apresenta um baixo coeficiente de sensibilidade à velocidade de deformação, mesmo deformado a diferentes ângulos em relação à direcção de laminagem.

A tensão está correlacionada com a evolução microestrutural que por sua vez é afectada pela deformação e velocidade de deformação. Através das curvas tensão-deformação podemos visualizar que a tensão aumenta rapidamente com o aumento da deformação, revelando um elevado expoente de encruamento. É bem sabido que o aço inoxidável AISI 304 é austenítico e possui uma baixa energia de falha de empilhamento. Deste modo, o endurecimento do material é acompanhado pela geração de deslocações, nucleação e transformação de martensite. A interpretação das características mecânicas do material em condições de carga específicas em termos de expoente de encruamento $\delta\sigma/\delta\varepsilon$ é especialmente útil.

De uma forma geral, a variação do expoente de encruamento é uma função da deformação, velocidade de deformação e temperatura, e é uma indicação da evolução microestrutural e mudança dos mecanismos de deformação. Com o aumento da velocidade de deformação, o expoente de encruamento aproxima-se de zero quando a deformação toma um valor a partir de 0,2. Este resultado permite indicar o aparecimento do amaciamento térmico nas velocidades de deformação mais elevadas.

Quando o expoente de encruamento apresenta um valor mais baixo, indica que estamos perante uma competição entre o amaciamento térmico e o expoente de encruamento. Os efeitos de um valor elevado do amaciamento térmico devido ao aumento da temperatura e superior ao efeito do expoente de encruamento, propicia para que a deformação plástica torna-se instável. O aparecimento do amaciamento térmico foi visto em muitos metais e ligas por vários investigadores ^[34, 35, 36] e está associado ao aquecimento dos materiais ou uma manifestação da recuperação dinâmica. Esta condição é atribuída à mudança do fluxo de tensões devido a uma variação significativa dos mecanismos de deformação, em que a taxa de controlo destes mecanismos variam a partir duma certa activação térmica a baixas velocidades de deformação para um mecanismo que apresenta descontinuidades, ou seja, instabilidades locais a velocidades de deformação mais elevadas.

Follansbee ^[37] mostra que não é somente a geração de deslocações mas também a nucleação e transformação de martensite que induzem a um aumento rápido no fluxo de tensões para elevadas velocidades de deformação.

Na figura 25 verificamos que o aumento da velocidade de deformação conduz ao aumento da temperatura do aço inoxidável AISI 304 que, por seu turno, altera a dinâmica das deslocações. A formação de martensite aumenta significativamente a resistência gerada pelo trabalho a frio. Contudo, o amaciamento térmico favorecido pelas elevadas velocidades de deformação permite a possibilidade de fractura prematura no material e o aparecimento de regiões de deformação localizada, indicando a existência de uma instabilidade estrutural. O amaciamento térmico produzido pelo aumento da temperatura pode ser facilmente detectado com recurso às curvas $(1/T) / \ln(\sigma)$, encontrando-se ilustrado na figura 26. Esta abordagem pressupõe que a relação entre a tensão de escoamento, temperatura e velocidade de deformação seja do tipo ^[38].



$$\sigma^{n'} = A \dot{\epsilon} \exp^{(Q/RT)} \quad (22)$$

em que,

- σ – é a tensão de escoamento;
- n' e A – são constantes do material;
- $\dot{\epsilon}$ – é a velocidade de deformação;
- Q – é a energia de activação para processos a quente;
- R – é a constante universal dos gases;
- T – é a temperatura absoluta.

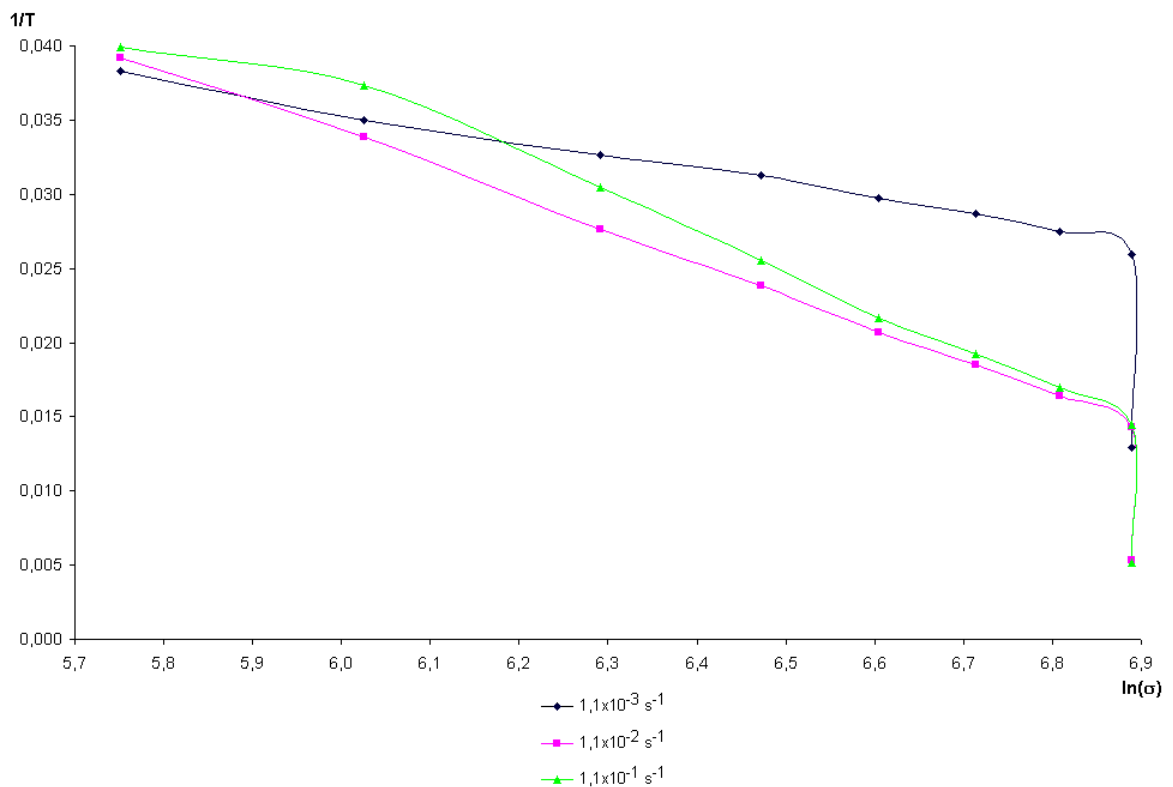


Figura 26. Relação entre a tensão com a temperatura do aço inoxidável AISI 304 para as diferentes velocidades de deformação.

Geralmente, os planos de deslizamento desempenham um papel muito importante durante a deformação e afectam o processo de deformação dos metais. O movimento das deslocações surge quando estas sobrepõem à energia dos obstáculos que influencia a resposta mecânica. A variação do fluxo de tensão com a velocidade de deformação e temperatura dependem da taxa de controlo do processo. Os resultados experimentais da dependência da temperatura e velocidade de deformação relativamente à tensão mostram uma forte correlação com o comportamento das deslocações. A tensão pode ser dividida em duas componentes:

- a) tensão térmica σ_a , referente à maioria dos obstáculos e que são dependentes da estrutura do material;



- b) tensão térmica σ^* , referente a uma pequena gama de obstáculos e que são dependentes da temperatura e velocidade de deformação.

Assumindo que a velocidade de deformação é controlada por um processo termicamente activado com uma determinada energia de activação, a relação entre a tensão aplicada, velocidade de deformação e temperatura pode ser descrita pela lei de Arrhenius ^[39]:

$$\dot{\varepsilon}_p = \dot{\varepsilon}_0 \exp \left(\frac{-Q_{(\sigma^*, T)}}{kT} \right) \quad (23)$$

em que,

$\dot{\varepsilon}_0$ – é o termo pré-exponencial,
k – constante de Boltzmann.

Se $\dot{\varepsilon}_0$ é constante durante a deformação a uma dada temperatura T, então

$$\left(\frac{\delta \ln \dot{\varepsilon}}{\delta \sigma^*} \right) = \frac{- \left(\frac{\delta Q}{\delta \sigma^*} \right)_T}{kT} = \frac{v^*}{kT} \quad (24)$$

em que,

$\sigma^* = \sigma - \sigma_a$,
 v^* – é o volume da energia de activação.

Consequentemente, a dependência da tensão e volume da energia de activação é expressa pela seguinte relação:

$$v^* = - \left(\frac{\delta Q}{\delta \sigma^*} \right)_T \quad (25)$$

O volume da energia de activação representa a média do volume de deslocações da estrutura que se encontram envolvidas no processo de deformação.

A comparação entre os valores de v^* com os do expoente de encruamento, permite mostrar a relação entre energia de activação, tensão, velocidade de deformação e microestrutura. Uma diminuição de v^* correlacionada com o aumento do expoente de encruamento, significa que a capacidade da activação térmica em ajudar o movimento das deslocações é restrita por causa do aumento da deformação e velocidade de deformação.

O aumento gradual da deformação resulta da mudança dos sistemas de deslizamento e aumento do aquecimento durante a deformação plástica. As elevadas velocidades de deformação afectam a multiplicação de deslocações e transformação de martensite. Contudo, o expoente de encruamento diminui de certa forma com o aumento da velocidade de deformação devido ao amaciamento térmico.



Obviamente que a diminuição do expoente de encruamento é devido às mudanças microestruturais, tais como a multiplicação de deslocamentos, nucleação e transformação de martensite, e todas elas são significativamente afectadas pela velocidade de deformação.

Para o material investigado, a redução do alongamento uniforme é explicado então pelo amaciamento térmico que surge após um valor crítico de deformação para elevadas velocidades de deformação. Por isso, podemos concluir que o cruzamento das curvas de tensão referidas anteriormente está associado a este aquecimento.



CAPÍTULO IV

CONCLUSÃO



O presente trabalho teve como objectivo analisar o efeito da velocidade de deformação nas propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304. Para o efeito, foram realizados ensaios de tracção uniaxial à temperatura ambiente e segundo diferentes orientações relativamente à direcção de laminagem. Simultaneamente, procedeu-se à medição da temperatura na superfície dos provetes por termografia, bem como da análise da formação de martensite após ruptura do material.

Da análise dos resultados, podemos concluir o seguinte :

- 1) O aço inoxidável AISI 304 exhibe uma forte anisotropia plástica quando deformado a diferentes orientações em relação à direcção de laminagem. Contudo, a anisotropia praticamente não varia com a mudança da velocidade de deformação.
- 2) Para elevadas velocidades de deformação e após um valor crítico de deformação, regista-se a ocorrência de uma instabilidade plástica precoce.
- 3) O principal mecanismo de encruamento do material tem a ver com a redução do percurso livre médio das deslocações devido à sua acumulação, embora para altas velocidades de deformação o encruamento é minimizado devido ao amaciamento térmico.
- 4) A diminuição do expoente de encruamento é acompanhado pelas mudanças microestruturais, tais como a multiplicação de deslocações, nucleação e transformação de martensite.
- 5) Durante o processo de deformação independentemente da velocidade de deformação empregue, regista-se a formação de martensite provavelmente em grãos com textura cristalográfica preferencial.
- 6) O aumento da velocidade de deformação conduz a um aquecimento substancial do material devido à sua fraca condutividade térmica.
- 7) Do ponto de vista da deformação plástica, quando o material é sujeito a elevadas velocidades de deformação, o trabalho plástico é convertido em calor durante um curto espaço de tempo. O calor dissipa de imediato em torno do material o que resulta, por seu turno, no aumento da temperatura local, causando desta forma o amaciamento térmico. Quando o amaciamento térmico é superior ao encruamento, a deformação plástica torna-se instável.
- 8) O aumento da velocidade de deformação leva a uma drástica redução da deformação e para o material investigado, essa redução é explicada pelo amaciamento térmico que ocorre a partir de um valor crítico de deformação.

Estes aços inoxidáveis, sendo muito utilizados na indústria de produção de equipamentos alimentares, são muito sensíveis ao atrito existente entre a chapa e as ferramentas do processo de estampagem, o qual pode provocar a gripagem da superfície da peça.



Dado que os processos de fabrico permitem a obtenção de peças mecânicas com cadências de produção elevadas, ou seja, a velocidades de deformação elevadas, no caso do material seleccionado ser o aço inoxidável AISI 304 é imperativo uma escolha adequada do tipo de materiais utilizados nas ferramentas e lubrificantes para contrabalançar os efeitos nefastos da temperatura.



BIBLIOGRAFIA



- [1] – A. H. Cottrell, “Proc. Conf. Properties of Materials at High Rates of Strain”, 1957
- [2] – Y. Estrin, “Unified Constitutive Laws of Plastic Deformation”, 1996
- [3] – D. Peckner e L. M. Bernstein, “Handbook of Stainless Steels”, 1977
- [4] – R. A. Lula, I. G. Parr e A. Hanson, “Stainless Steel”, 1986
- [5] – S. Fukumoto e W. Kurtz, “ISIJ International - Vol. 37”, 1997
- [6] – L. E. Murr, “Interfacial Phenomena in Metals and Alloys”, 1975
- [7] – A. H. Eichelman, Jr. e F.C. Hull, “The Effect of Composition on the Temperature of Spontaneous Transformation of Austenite to Martensite Stainless Steel – Trans. ASM - Vol. 45”, 1953
- [8] – E. P. Butler e M. G. Burke, “Preferential Formation of Martensite in Type 304 Stainless Steel: A Microestrutural and Compositional Investigation, Solid-Solid Phase Transformations”, 1982
- [9] – T. Angel, “Formation of Martensite in Austenitic Stainless Steels – J. Iron Steel Inst. - Vol. 177”, 1954
- [10]– J. P. Bressanelli e A. Moskowitz, “Effects of Strain Rate, Temperature and Composition on Tensile Properties of Metastable Austenitic Stainless Steels”, 1966
- [11]– G. L. Huang, D. K. Matlock e G. Krauss, “Martensite Formation, Strain Rate Sensitivity and Deformation Behaviour of Type 304 Stainless Steel Sheet – Metall. Trans. A - Vol. 20A”, 1989
- [12]– S. S. Hecker, M. G. Stout, K. P. Staudhammer e J. L. Smith, “Effects of Strain State and Strain Rate on Deformation-Induced Transformation in 304 Stainless Steel: Part I and II – Metall. Trans. A - Vol. 13A”, 1982
- [13]– G. B. Olson, “Transformation Plasticity and the Stability of Plastic Flow, Deformation, Processing and Structure – American Society for Metals”, 1984
- [14]– G. L. Huang, D. K. Matlock e G. Krauss, “Martensite Formation, Strain Rate Sensitivity and Deformation Behavior of Type 304 Stainless Steel Sheet”, 1989
- [15]– S. L. Semiatin e J. H. Holbrook, “Metall. Tans. A”, 1983
- [16]– S. Venugopal, S. L. Mannan e Y. V. R. K. Prasad, “Metall. Trans. A”, 1992
- [17]– D. Sundararaman, R. Divakar e V. S. Raghunathan, “Ser. Metall. Mater.”, 1993



- [18]– A. Kanni Raj e K. A. Padmanabhan, “Prediction of the Formability of Metastable Low Nickel Austenitic Stainless Steel Sheets”, 2000
- [19]– P. P. Date e K. A. Padmanabhan, “On the Prediction of the Forming Limit Diagram of Sheet Metals, 1994
- [20]– E. F. Rauch, “Plasticity of metals during cold working”, 1999
- [21]– E. F. Rauch, “Material Science Engineering A234-236”, 1997
- [22]– P. E. Johnson, J. H. Schimdt, S. A. Vincent e J. W. Morris Jr., “Scripta Metallurgical 24”, 1990
- [23]– J. P. Bressanelli e A. Moskowitz, “Effects of Strain Rate, Temperature and Composition on Tensile Properties of Metastable Austenitic Stainless Steels”, 1966
- [24]– J. Gil Sevillano, P. Van Houtte e E. Aernoudt, “Program Material Science 25”, 1980
- [25]– Johan Moverare e Magnus Odén, “Deformation behaviour of a prestrained duplex stainless steel”, 2001
- [26]– H. B. Campos, J. J. Grácio, F. Teixeira-Dias, J. E. Rocha e J. Ferreira Duarte, “Influence of Strain Rate on the Plastic Behaviour of 304 Stainless Steel”, Inst. J. Plasticity, 2001
- [27]– J. J. Grácio, F. Barlat, E. F. Rauch, A. B. Lopes, P. T. Jones, G. T. Vincze, P. C. Costa, J. E. Rocha e R. P. Cardoso, “Effect of Texture and Microstructure on Strain Hardening During Monotonic Loading”, Inst. J. Plasticity, 2002
- [28]– A. Nadai, “Theory of Flow and Fracture of Solids”, 1950
- [29]– G. Gaussorgues, “La Thermographie Infrarouge”, 1981
- [30]– A. B. Lopes, E. F. Rauch e J. Grácio, “Acta Material 47”, 1999
- [31]– A. B. Lopes, “Análise Microestrutural das Instabilidades Plásticas em Materiais Metálicos”, 2001
- [32]– J. H. Hollomon, “Trans. AIME”, 1945
- [33]– A. H. Cottrell, “An Introduction to Metallurgy”, 1975
- [34]– J. D. Campbell, “Mater. Sci. Eng.”, 1973
- [35]– M. A. Meyers, G. Subhash, B. K. Kad e L. Prasad, “Mech. Mater.”, 1994



- [36]– I. Hardino, “Met. Technol.”, 1977
- [37]– P. S. Follansbee e U. F. Kocks, “Acta Metall.”, 1988
- [38]– C. M. Sellars e W. J. McG. Tegart, “Mem. Sci. Rev. Metall., vol. 63”, 1966
- [39]– W. S. Lee e C. F. Lin, “Effects of Prestrain and Strain Rate on Dynamic Deformation Characteristics of 304L Stainless Steel”, 2002