

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**AVALIAÇÃO DE UM CRITÉRIO DE EQUIVALÊNCIA ENTRE DADOS DE
TRAÇÃO A QUENTE E FLUÊNCIA EM AÇOS**

Noeli Bragalda dos Santos

São Carlos

2007

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**AVALIAÇÃO DE UM CRITÉRIO DE EQUIVALÊNCIA ENTRE DADOS DE
TRAÇÃO A QUENTE E FLUÊNCIA EM AÇOS**

Noeli Bragalda dos Santos

**Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciência
e Engenharia de Materiais como requisito
parcial à obtenção do título de MESTRE
EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Orientador: Ph.D Levi de Oliveira Bueno

Co-orientador: Ph.D Tomaz Toshimi Ishikawa

São Carlos

2007

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

S237ac

Santos, Noeli Bragalda dos.

Avaliação de um critério de equivalência entre dados de tração a quente e fluência em aços / Noeli Bragalda dos Santos. -- São Carlos : UFSCar, 2009.

125 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2007.

1. Engenharia de materiais. 2. Deformação plástica a quente. 3. Fluência. 4. Deformações e tensões. 5. Propriedades mecânicas. I. Título.

CDD: 620.11 (20ª)

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado ao meu pai Wilson Ricardo dos Santos e a minha mãe Nilva Bragalda dos Santos, cujo apoio foi fundamental para a sua realização.

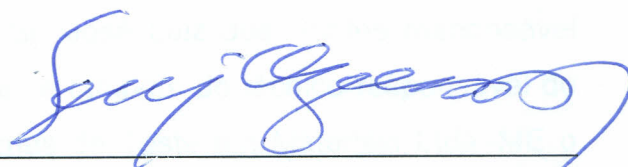
VITAE DO CANDIDATO

Engenheira Química pela Faculdade de Engenharia Química de Lorena (2003).

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
NOELI BRAGALDA DOS SANTOS

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS,
EM 28 DE JUNHO DE 2007.

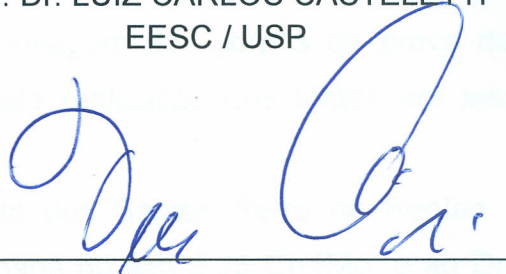
BANCA EXAMINADORA:



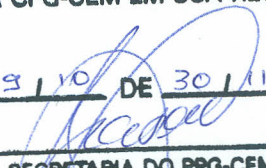
Prof. Dr. LEVI DE OLIVEIRA BUENO
Orientador
DEMa / UFSCar



Prof. Dr. LUIZ CARLOS CASTELLETTI
EESC / USP



Prof. Dr. WALTER LIBARDI
DEMa / UFSCar

APROVADO / HOMOLOGADO / REFERENDADO
PELA CPG-CEM EM SUA REUNIÃO
Nº 519 / 10 DE 30 / 11 / 2010

SECRETARIA DO PPG-CEM

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Levi de Oliveira Bueno pela orientação e colaboração fundamentais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Para a obtenção dos ensaios de tração foi de suma importância a colaboração do técnico Sr. José Luiz dos Santos responsável pela máquina Instron do DEMa/UFSCar e também do técnico responsável do Laboratório de Fluência da STM-Sistemas de Teste em Materiais Ltda.-ME o Sr. Renato Isaac Cardoso, pela colaboração em todos os ensaios de fluência.

Outro agradecimento à secretária Cristina Marques Linos pela digitação do conjunto de dados de fluência obtidos na STM, da série de dados de fluência e tração a quente de autores internacionais analisados neste trabalho, bem como pela organização e digitação de partes do texto da dissertação.

Agradeço o apoio da empresa STM em razão de disponibilizar os recursos necessários à usinagem dos corpos de prova de tração a quente e fluência, bem como pela realização dos testes em seu Laboratório de Ensaios de Fluência.

Ao Eng^o Flavio Augusto dos Santos Serra da Replan / Petrobrás em decorrência da doação da chapa do aço 2,25 Cr-1Mo, e ao Dr. Tito Luiz da Silveira da FESM e COPPE/UFRJ pela doação das amostras de aço AISI 310 para os ensaios de tração e fluência.

Finalmente meus agradecimentos ao Dr.R.L.Klueh R. L do ORNL, USA, pelo envio de uma série de artigos pelo correio que foram de grande importância para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho foi realizado em quatro etapas, a primeira visando compreender os fenômenos que atuam no aço 2,25Cr-1Mo tracionado a quente em diferentes condições, observando seu comportamento numa ampla faixa de temperatura e taxas de deformação, visando completar o estudo inicial de Reis Sobrinho (10), que empregou as seguintes condições de teste: Velocidades de Tração (V_T) = 20 – 5 – 1,0 – 0,1 – 0,01 mm/min e Temperaturas (T) de 500, 550, 600, 650 e 700°C. No presente estudo foram usados para os novos ensaios os parâmetros de: V_T de 200 a 0,001 mm/min e Temperaturas: ambiente, 100, 200, 300, 400 e 450°C, disponibilizando informações mais completas do comportamento do material.

A terceira etapa visou a realização de análise detalhada do conjunto de dados de tração a quente e fluência para o aço 2,25Cr-1Mo na aplicação em critério de equivalência, ressaltando que esta gama de dados propiciadas pelos ensaios realizados, teve um incremento em razão das informações obtidas por ocasião de levantamento bibliográfico do mesmo aço em diferentes condições de ensaio na faixa de temperatura de 500°C a 600°C, geradas por Klueh (48,49) e Klueh & Oakes (50 – 52).

A análise destes parâmetros, que consistiu na verificação da validade do critério de equivalência proposto para o aço 2,25Cr-1Mo, fecha a primeira etapa do trabalho, dando início a uma quarta fase, visando verificar a confiabilidade da metodologia proposta para outros materiais, na qual o mesmo tipo de análise foi aplicado para o aço AISI 310.

O encerramento consistiu em tentativa preliminar de estudar fluência no aço 2,25Cr-1Mo à temperatura ambiente, cuja possível existência foi indicada em análise de dados de tração aplicando o critério de equivalência .

ASSESSMENT OF A CRITERION OF EQUIVALENCE BETWEEN HOT TENSILE DATA AND CREEP DATA ON STEELS.

ABSTRACT

This work was conducted in four stages, the first to understand the phenomena that affect the 2.25Cr-1Mo steel hot tensile in different conditions, observing their behavior in a wide range of temperature and strain rates, to complete the initial study of Reis Sobrinho [10], that employed the following test conditions: Crosshead speed (V_C) = 20; 5; 1.0; 0.1; 0.01 mm/min and Temperatures (T) 500, 550, 600, 650 and 700°C. In the present study were used to further test the parameters of: V_C from 200 to 0.001 mm/min and Temperatures: room temperature, 100, 200, 300, 400 and 450°C providing more complete information of the behavior of the material.

The third step aimed to achieve the detailed analysis of the data set of the hot tensile and creep for 2.25Cr-1Mo steel in applying the criterion of equivalence, emphasizing that this range of data provided by testing, had increased because of bibliographic information obtained with the same steel at different test conditions in the temperature range from 500°C to 600°C generated by Klueh [48,49] and Klueh & Oakes [50–52].

The analysis of these parameters, which consisted in verifying the validity of the criterion of equivalence proposed for 2.25Cr-1Mo steel, closes the first stage of this work, starting a fourth phase, to verify the reliability of the methodology proposed for other materials, in which the same type of analysis was applied to the AISI 310 steel.

The closure was to attempt preliminary creep study in 2.25 Cr-1Mo steel at room temperature, whose possible existence was indicated by analysis of the tension data applying the criterion of equivalence.

ÍNDICE DE ASSUNTOS

	Pag.
BANCA EXAMINADORA	i
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
SUMÁRIO	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xix
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 O Aço Ferrítico Baixa Liga 2.25Cr -1Mo	5
2.2 O Ensaio de Tração	7
2.2.1 A Curva Tensão Versus Deformação	7
2.2.2 O Fenômeno do Encruamento e da Sensibilidade a Taxa de Deformação	10
2.2.3 Efeito de Envelhecimento Dinâmico por Deformação.....	18
2.3 O Fenômeno de Fluência	20
2.3.1 Curva Convencional de Fluência	20
2.3.2 Principais Mecanismos de Fluência	22
2.3.3 Principais Relações e Parâmetros de Fluência	27
2.3.4 Métodos Tradicionais de Parametrização de Resultados	31
2.4 Equivalência Entre Comportamentos de Tração a Quente e Fluência	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 Materiais	43
3.1.1 O Aço Ferrítico 2.25Cr -1Mo	43
3.1.2 O Aço Inoxidável Austenítico AISI 310	44
3.2 Ensaio de Tração a Quente	44
3.2.1 No Aço Ferrítico 2.25Cr -1Mo	44

3.2.2 No Aço Inoxidável AISI 310	47
3.3 Ensaio de Fluência	47
3.3.1 No Aço Ferrítico 2.25Cr -1Mo	47
3.3.2 No Aço Inoxidável Austenítico AISI 310	49
3.4 Análise dos dados de tração a quente e fluência de outros autores..	50
4 RESULTADOS.....	53
4.1 Resultados de Tração a Quente no Aço 2.25Cr -1Mo na faixa de 25° a 700°C	53
4.1.1 Avaliação da Resistência e Ductilidade nos Ensaio de Tração a Quente em diferentes Temperaturas e Taxas de Deformação	53
4.1.2 Determinação do Limite de escoamento e do Módulo de Elasticidade mediante a utilização de Ensaio de Tração com Extensometria	61
4.1.3 Avaliação dos Parâmetros referentes ao Encruamento e a Sensibilidade a Taxa de Deformação	64
4.2 Análise de novos dados no Aço 2.25Cr -1Mo visando a confirmação do critério de equivalência entre tração a quente e fluência	80
4.2.1 Considerando-se os ensaios complementares realizados neste trabalho	80
4.2.2 Análise considerando os dados de outros autores	83
4.2.3 Resultados de Equivalência no Aço Inoxidável Austenítico AISI310	91
4.2.4 Confirmação de existência do fenômeno de fluência à temperatura ambiente no aço 2.25Cr -1Mo	96
5 DISCUSSÃO	107
6 CONCLUSÕES	115
7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	117
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

ÍNDICE DE TABELAS

	Pag.
Tabela 2.1 – Composição química do aço 2,25Cr-1Mo conforme as especificações da ASTM A 387, grau 22 (na chapa)	5
Tabela 2.2 – Elementos de liga e suas funções principais	6
Tabela 2.3 – Classificação do aço 2,25Cr-1Mo com relação a diferentes tratamentos térmicos	7
Tabela 3.1 – Composição química do aço AISI 310.....	44
Tabela 3.2 - Condições para os Ensaios de Tração.....	46
Tabela 3.3 – Condições de Tensão e Temperatura dos ensaios de Fluência e seus tempos de ruptura	48
Tabela 4.1 – Variação dos valores de n' e K' nas diversas condições de Temperatura e Velocidade de Tração deste trabalho.....	71
Tabela 4.2 – Valores do Expoente de Sensibilidade à Taxa de Deformação no Limite de Resistência e na Tensão de escoamento.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 2.1 – Curva esquemática Tensão Nominal versus Deformação Nominal em um ensaio de tração com velocidade constante de travessão.....	9
Figura 2.2 – Comportamento do aço 2,25Cr-1Mo a 700°C exibindo sensibilidade a taxa de deformação [9].....	11
Figura 2.3 – Comportamento Elasto - Plástico dos materiais com n' variando de 0 a 1.....	13
Figura 2.4 – Gráfico comparativo esquemático dos valores de n' e m' em função do aumento da temperatura, para o aço 2,25Cr-1Mo [7,8].....	14
Figura 2.5 – Variação da velocidade de redução de área com a área transversal do corpo de prova para diferentes valores de m'	16
Figura 2.6 – Tipos de serrilhado, durante a tração a quente.....	19
Figura 2.7– Curva típica de um ensaio de fluência a carga constante apresentando os três estágios de deformação.....	21
Figura 2.8 – Fluxo de vacâncias com base na teoria de Nabarro-Herring [18] e Coble [16].....	24
Figura 2.9 – Princípio do deslizamento do contorno de grão: a) fluência convencional [19]; b) superplasticidade [19].....	26
Figura 2.10 – a) Gráfico Log (Tensão) x Log (Tempo de Ruptura), para dados em iso-temperatura.....	30
Figura 2.10 – b) Gráfico Log (Taxa Mínima de Fluência) x Log (Tensão), para dados em iso-temperatura.....	30
Figura 2.10 – c) Gráfico LN (Taxa Mínima de Fluência) x Inverso (Temperatura Absoluta), para dados em iso-tensão.....	31

Figura 2.10 – d) Gráfico Log (Taxa Mínima de Fluência) x Log (Tempo de Ruptura), para todos os dados de fluência (iso-temperatura e iso-tensão).....	31
Figura 2.11 – Padrão das linhas de iso-tensão no espaço Log (t_r) x $1/T$, segundo Larson-Miller [29].....	32
Figura 2.12 – Conversão de uma família de dados Log(σ) x Log (t_r) em uma única curva de referência Log(σ) x P, segundo o método de Larson-Miller [29].....	33
Figura 2.13 – Padrão das linhas de iso-tensão no espaço Log (t_r) x T, segundo Manson-Haferd [33].....	34
Figura 2.14 – Conversão de uma família de dados Log (σ) x Log (t_r) em uma única curva de referência Log (σ) x P, segundo o método de Manson-Haferd [33].....	34
Figura 2.15 – Previsão do comportamento de tração a quente a partir de dados de fluência, segundo o modelo de Osgerby & Dyson [40]. Material: superliga à base de Níquel.....	37
Figura 2.16 – Analogia dos parâmetros envolvidos nos testes de tração e fluência com o sumário das regras de equivalência entre os fenômenos..	39
Figura 2.17 – a) Log (Taxa mínima de fluência) versus Log (Tensão), segundo Reis Sobrinho [9].....	40
Figura 2.17 – b) LN (Taxa mínima de fluência) versus $1/T$ segundo Reis Sobrinho [9].....	40
Figura 2.17 – c) Log (Taxa mínima de fluência) versus Log (Tempo de ruptura) segundo Reis Sobrinho [9].....	41
Figura 2.17 – d) Log (Tensão) versus Log (Tempo de ruptura) segundo Reis Sobrinho [9].....	41
Figura 2.18 – Curvas de parametrização segundo o método de Manson-Haferd [33]: a) usando dados de tempo de ruptura; b) usando dados de taxa mínima de fluência acoplados à relação de Monkman-Grant. Material: aço ferrítico 2,25Cr-1Mo [42,43].....	42

Figura 3.1 – Microestruturas do aço 2,25Cr –1Mo como recebido. Ataque Nital 2%. a) Microscopia ótica com aumento original no aparelho de 200x; b) Idem, 500x; c) M.E.V., com aumento original no aparelho de 1000x; c) Idem 2000x.	43
Figura 3.2 – Esquema dos corpos de prova para os ensaios de tração: a) com extensometria; b) sem extensometria	45
Figura 3.3 – Esquema dos corpos de prova para os ensaios de tração a quente no aço inoxidável AISI 310.....	47
Figura 3.4 – a) Máquina de ensaios de tração servo-hidráulica INSTRON, modelo 8802; b) Conjunto de máquinas de ensaios de fluência usadas no presente trabalho.....	50
Figura 4.1 – Gráficos Tensão/Deformação em função da velocidade de tração: a) VT=0.01 mm/min, b) VT=0.25 mm/min, c) VT =1 mm/min, d) VT=5 mm/min, e) VT=20 mm/min e f) VT =200 mm/min.....	54
Figura 4.2 – a) Dados comparativos da tensão de escoamento, b) dados comparativos do limite de resistência, na faixa da temperatura ambiente a 700°C.....	56
Figura 4.3 – a) Variação do Alongamento Final e b) Variação do Redução de Área com a temperatura na faixa que vai da temperatura ambiente a 700°C.....	57
Figura 4.4 – Variação de: a) Tensão de Escoamento e b) Limite de Resistência com o logaritmo da taxa de deformação, para a faixa de temperatura utilizada nos ensaios.....	59
Figura 4.5 – Variação de: a) Alongamento Final e b) Redução de Área, com logaritmo da taxa de deformação nominal, para as temperaturas ensaiadas.....	60
Figura 4.6 – Gráfico: a) Tensão / Deformação para ensaios de tração a quente com extensometria com as temperaturas variando na faixa que vai da temperatura ambiente a 700°C b) Variação da velocidade de tração com a retirada do extensômetro.....	62

Figura 4.7 – Gráfico a) limite de escoamento; b) Limite de Resistência com a Temperatura	63
Figura 4.8 – Gráfico a) Variação do Alongamento Final e b) Redução de Área com a temperatura	63
Figura 4.9 – Gráfico da Variação do Módulo de Elasticidade com a Temperatura	64
Figura 4.10 – Gráficos da variação de n' (Expoente de Encruamento) com a Taxa de Deformação para: a) Temperatura Ambiente b) 100°C; c) 200°C, d) 300°C, e) 400°C, f) 450°C.	66
Figura 4.10 – Gráficos da variação de n' (Expoente de Encruamento) com a Taxa de Deformação para: g) 500°C; h) 550°C, i) 600°C, j) 650°C, k) 700°C.	67
Figura 4.11 – Variação do Coeficiente de Resistência K' com o Logaritmo da Taxa de Deformação para: a) Temperatura Ambiente, b) 100°C, c) 200°C, d) 300°C, e) 400°C e f) 450°C.....	68
Figura 4.11 – Variação do Coeficiente de Resistência K' com o Logaritmo da Taxa de Deformação: g) 500°C, h) 550°C, i) 600°C, j) 650°C e k) 700°C.....	69
Figura 4.12 – Variação do Expoente de Encruamento em diferentes níveis de Velocidades de Tração desde a temperatura ambiente até 700°C.....	72
Figura 4.13 – Variação do Coeficiente de Resistência com a Temperatura para as diferentes Velocidades de Tração.....	72
Figura 4.14 – Variação do Logaritmo da Tensão de Escoamento com o logaritmo da Taxa de Deformação: a) Temperatura Ambiente, b) 100°C, c) 200°C, d) 300°C, e) 400°C, f) 450°C.....	73
Figura 4.14 – Variação do logaritmo da Tensão de Escoamento com o logaritmo da Taxa de Deformação: g) 500°C, h) 550°C, i) 600°C, j) 650°C, k) 700°C.....	74

Figura 4.15 – Variação do Logaritmo do Limite de Resistência à Tração com o logaritmo da Taxa de Deformação: a) Temperatura Ambiente, b) 100°C, c) 200°C, d) 300°C, e) 400°C e f) 450°C.....	75
Figura 4.15 – Variação do logaritmo do Limite de Resistência à Tração com o logaritmo da taxa de deformação: g)500°C, h)550°C, i)600°C,j) 650°C e k)700°C.....	76
Figura 4.16 – a) Variação de m' com a temperatura na Tensão de Escoamento; b) Variação de m' com a temperatura no Limite de Resistência.....	78
Figura 4.17 – a) Variação da constante C' com a temperatura para a Tensão de Escoamento; b) Variação da Constante C' com a temperatura para o Limite de Resistência.....	79
Figura 4.18 – Variação da Taxa Mínima de Fluência com a Tensão para os resultados de fluência e tração convertidos pelo Critério de Equivalência.....	80
Figura 4.19 – Variação da Taxa Mínima de Fluência com o Tempo de Ruptura para os resultados de fluência e os de tração convertidos pelo critério de equivalência e comparados com os dados de fluência de Viswanathan [53].....	81
Figura 4.20 – Variação da Taxa Mínima de Fluência com o inverso da Temperatura, para os resultados de fluência e tração convertidos pelo critério de equivalência.....	82
Figura 4.21 – Variação da Tensão com o Tempo de Ruptura para os ensaios de fluência e os de tração convertidos pelo critério de equivalência.....	83
Figura 4.22 – a) Variação da Taxa mínima de fluência com a Tensão para o aço 2,25Cr-1Mo na condição AN-1.....	85
Figura 4.22 – b) Variação da Taxa mínima de fluência com o Tempo de ruptura para o aço 2,25Cr-1Mo na condição AN-1;c)Variação Resistência à fluência com Tempo de ruptura para aço 2,25Cr-1Mo condição AN-1.	86

Figura 4.23 – a) Variação da Taxa mínima de fluência com a Tensão para o aço 2,25Cr-1Mo na condição AN-2; b) Variação da Taxa mínima de fluência com o Tempo de ruptura para o aço 2,25Cr-1Mo na condição AN-2.....	87
Figura 4.23 – c) Variação da Resistência à fluência com a Tempo de ruptura para o aço 2,25Cr-1Mo na condição AN-2.....	88
Figura 4.24 –a) Variação da Taxa mínima de fluência com a Tensão para o aço 2,25Cr-1Mo na condição I A.....	88
Figura 4.24 –b) Variação da Taxa mínima de fluência com o Tempo de ruptura para o aço 2,25Cr-1Mo na condição I A; c) Variação da Resistência à fluência com a Tempo de ruptura para o aço 2,25Cr-1Mo na condição I A.....	89
Figura 4.25 –a) Variação da Taxa mínima de fluência com a Tensão para o aço 2,25Cr-1Mo na condição N + R; b) Variação da Taxa mínima de fluência com o Tempo de ruptura para o aço 2,25Cr-1Mo na condição N + R.....	90
Figura 4.25 – c) Variação da Resistência à fluência com a Tempo de ruptura para o aço 2,25Cr-1Mo na condição N + R	91
Figura 4.26 – Gráfico de Tensão versus Deformação para os ensaios de tração no Aço AISI 310 a 700°C.....	92
Figura 4.27 –a :Gráfico de Deformação versus Tempo para o aço AISI 310 a 700°C:a) para as tensões de 70 MPa, 90 MPa, 130 MPa e 140 Mpa; b:Gráfico de Deformação versus Tempo para o aço AISI 310 a 700°C: b) para as tensões de 165 MPa, 180 MPa e 210 MPa.....	92
Figura 4.27 –c:Gráfico de Deformação versus Tempo para o aço AISI 310 a 700°C: c) 250 MPa, 300 MPa, 344 MPa e 375 MPa.....	93
Figura 4.28 – a) Análise dos dados do Aço AISI 310,segundo o resistência a fluência com o tempo de ruptura; b) Análise dos dados do Aço AISI 310, segundo o diagrama de Norton [27].....	94

Figura 4.28 – c) Análise dos dados do Aço AISI 310, segundo o diagrama de Monkman-Grant [28].....	95
Figura 4.29 – Exemplo de curvas de fluência do aço 2,25Cr -1Mo ensaiado à temperatura ambiente com a) 558 MPa, b) 548 MPa, c) 530 MPa, d) 520 MPa, e) 510 MPa e f) 505 MPa.....	98
Figura 4.30 – Dados de fluência na temperatura ambiente, segundo o diagrama de Norton (27).....	99
Figura 4.31 – Variação da Tensão versus tempo de Ruptura para resultados de fluência na temperatura ambiente.....	100
Figura 4.32 – Dados de fluência na temperatura ambiente, segundo o diagrama de Monkman-Grant (28).....	100
Figura 4.33 – Dados de fluência e tração na temperatura ambiente, segundo o diagrama de Norton (27).....	101
Figura 4.34 – Variação da Tensão versus tempo de Ruptura para resultados de fluência e tração na temperatura ambiente.....	101
Figura 4.35 – Dados de fluência e tração na temperatura ambiente, segundo o diagrama de Monkman-Grant (28).....	102
Figura 4.36 – Dados de fluência e tração na temperatura ambiente, comparado com o restante dos dados na faixa de 500°C a 700°C, segundo o diagrama de Norton (27).....	102
Figura 4.37 – Dados de fluência e tração na temperatura ambiente, comparado com o restante dos dados na faixa de 500°C a 700°C, segundo o diagrama de Monkman-Grant (28).....	103
Figura 4.38 – Dados de fluência e tração na temperatura ambiente, comparados com o restante dos dados na faixa de 500°C a 700°C, segundo o diagrama de variação de Resistência a Fluência com o Tempo de Ruptura	104
Figura 4.39 – Variação de n (Expoente de Norton) com a Tensão para os dados de fluência e tração.....	105

Figura 4.40 – Variação de m' com a Tensão para os dados de fluência e tração..... 106

SÍMBOLOS E ABREVIações

ε - deformação verdadeira

$\dot{\varepsilon}$ - taxa de deformação

$\dot{\varepsilon}_{\min}$ - taxa mínima de fluência

ε_r - alongamento final

$\dot{\varepsilon}_s$ - taxa estacionária de fluência

ε_u - deformação verdadeira no ponto de carga máxima

ε_o - alongamento inicial

$\dot{\varepsilon}_o$ - taxa de fluência inicial sob a ação de σ_o

σ_o - tensão inicial para ocorrência de plasticidade

σ - tensão verdadeira

ω - parâmetro que descreve a fluência terciária devido à cavitação intergranular

A - área atual do corpo-de-prova

A_o - área inicial do corpo-de-prova

A - coeficiente da relação de Norton

B - coeficiente da relação de Arrhenius

C - constante

C - Carbono

C - coeficiente de Larson-Miller (fluência)

C' - coeficiente de sensibilidade a taxa de deformação

Cr - Cromo

d ε /dt - taxa de deformação

e - deformação nominal

F - carga

Fe - Ferro

- H** – tensão interna normalizada, que produz fluência primária, com valor de saturação H^* e coeficiente de encruamento h
- K** – constante de Monkman Grant
- K'** – coeficiente de resistência
- k** - constante
- L** - comprimento final do corpo-de-prova
- L_o** - comprimento inicial do corpo-de-prova
- m** - expoente de Monkman Grant
- m'** - expoente de sensibilidade a taxa de deformação
- Mn** - Manganês
- Mo** - Molibdênio
- n** - expoente da relação de Norton
- n'** - expoente de encruamento
- P** - Fósforo
- Q_f** - energia de ativação do expoente de fluência
- R** - constante universal dos gases
- S** - tensão nominal
- S'** - parametro que descreve fluência terciária devido a mecanismos de recuperação por discordâncias
- S** - Enxofre
- S_i** - Silício
- T_f** - temperatura absoluta de fusão do metal
- t_r** - tempo de ruptura
- V_c** - velocidade de redução de área
- V_T** - velocidade de tração

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem seu foco principal voltado para análise, da equivalência entre os fenômenos de tração à quente e fluência nos metais. Sendo de fundamental importância para esta análise uma compreensão mais abrangente da atuação de diversos mecanismos nesses materiais, quando ensaiados em condições específicas de temperatura, velocidade de tração e tensão.

Em trabalhos produzidos no Laboratório de Fluência do DEMa/UFSCar, publicados a partir de 2004, foi proposto um critério que estabelece as seguintes relações entre os fenômenos de tração a quente e fluência:

1 A taxa de deformação no teste de tração a quente é virtualmente idêntica à taxa mínima de fluência no teste de fluência.

2 A tensão máxima no teste de tração a quente é virtualmente idêntica à tensão aplicada no teste de fluência.

3 O tempo para ocorrência da tensão máxima no teste de tração a quente é virtualmente idêntico ao tempo de ruptura.

A validade desse critério foi verificada inicialmente com sucesso utilizando-se dados de fluência e tração a quente no aço 2,25Cr-1Mo gerada na faixa de 500 a 700°C.

O aço 2,25Cr-1Mo foi selecionado para este estudo em decorrência da sua extensa utilização na indústria química e petroquímica nacional, principalmente na faixa de 500°C a 650°C.

Visando verificar melhor a consistência do critério mencionado, este trabalho se propõe a ampliar os estudos realizados anteriormente considerando uma gama maior de condições de ensaio focalizando o comportamento de tração, principalmente na faixa de 25 a 500°C. Além disso, pretende-se realizar uma verificação das faixas de trabalho em que ocorrem mecanismos como Envelhecimento Dinâmico por Deformação que atuam com maior frequência e intensidade em condições específicas de ensaio, acarretando alterações no comportamento do aço.

Na realização do levantamento bibliográfico, obteve-se uma série de dados numéricos de tração a quente e fluência reportados na literatura por pesquisadores do ORNL (Oak Ridge National Laboratories) para o aço 2,25Cr-1Mo na faixa de temperaturas de aproximadamente 500 a 600°C. Devido ao grande detalhamento empregado pelos autores na descrição desses dados, foi possível realizar a sua conversão com base no critério de equivalência, vindo a somar com o conjunto de dados obtidos em nossos trabalhos.

A análise do conjunto de dados também propiciou a verificação do comportamento do material com relação aos fenômenos de encruamento e de sensibilidade da tensão com a taxa de deformação, exibindo diferentes comportamentos para os parâmetros n' e m' , respectivamente dependendo dos níveis de temperatura e taxas de deformação utilizados. Posteriormente, a análise individual dos ensaios segundo as metodologias analíticas apropriadas a cada situação (tração a quente e fluência), permitiu que fossem realizadas correlações entre importantes parâmetros dos dois processos.

Este trabalho foca principalmente na verificação das variáveis comportamentais do aço 2,25Cr-1Mo quando submetido às mais diversas condições de ensaio em tração e fluência, procurando validar definitivamente o critério de equivalência neste caso. Para trazer maior abrangência ao estudo estabeleceu-se a mesma proposta de trabalho para o aço inoxidável austenítico AISI 310, mediante sua utilização em uma série de ensaios de tração a quente e de fluência a 700°C como primeira tentativa para confirmar a validade do critério proposto, também em outros aços.

A comprovação do critério de equivalência é importante na medida que permite um intercâmbio entre os dados de tração a quente e fluência, que poderá ser bastante útil em certos estudos na prática, dependendo da disponibilidade de um ou outro tipo de equipamento, ou tipo de aplicação desejada para os dados. A questão da substituição de um tipo de ensaio pelo outro não é o caso de estudo do presente trabalho. As poucas informações

relatadas na literatura sobre esse assunto, no passado, não chegam a um acordo sobre essa questão: se os ensaios de tração a quente poderão substituir os ensaios de fluência ou vice-versa.

Como decorrência destes estudos, verificou-se ainda a possibilidade de ocorrência do fenômeno de fluência à temperatura ambiente nos aços, fenômeno que apresenta raríssimas citações na literatura. O trabalho experimental nessas condições mostra a existência de curvas completas de fluência com os três estágios (primário, secundário e terciário) para o aço 2,25Cr-1Mo, que se correlacionam bem com os dados de tração na temperatura ambiente, através do critério de equivalência.

Portanto a análise dos dados de tração e fluência segundo a metodologia do critério de equivalência proposto fornece uma visão bem mais integrada sobre o comportamento de deformação dos metais, que pode ter implicações importantes no futuro, tanto do ponto de vista científico como tecnológico.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O Aço Ferrítico Baixa Liga 2.25Cr-1Mo

O presente estudo foi realizado no aço 2,25Cr-1Mo em virtude da sua extensa aplicação industrial, por se tratar de um material que admite altos níveis de tensão e pela faixa de temperatura moderada na qual ele é mais utilizado (500°C e 650°C) [1].

A fabricação do aço 2,25 Cr–1Mo, é padronizada pelas especificações da norma ASTM A-387 [2]. A sua composição química nominal é apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Composição Química do aço 2.25Cr-1Mo conforme as especificações da ASTM A 387, grau 22 (na forma de chapa).

Composição Química Padronizada do Aço 2.25Cr-1Mo			
Elementos (% peso)			
Fe	Bal.	Si	< 0,5
Cr	1,90 – 2,60	Mn	0,3 – 0,6
Mo	0,87 – 1,13	P	< 0,03
C	< 0,15	S	< 0,03

Obs. Teor de elementos residuais não devem exceder 1%.

A microestrutura do material é dependente de variáveis como: concentração dos elementos presentes e principalmente tratamentos térmicos.

As propriedades mecânicas deste material são retratadas principalmente com relação a diversos parâmetros referentes aos ensaios de tração a quente e fluência [1].

Quanto às influências causadas pelos principais elementos de liga neste aço, as mais significativas estão apresentadas na Tabela 2. 2 [3]:

Os aços cromo-molibdênio caracterizam-se por possuírem, no estado temperado e revenido, elevados valores de Limite de Escoamento e excelente

resistência ao desgaste. De uma forma geral a adição de molibdênio em aços com cromo melhora todas as propriedades mecânicas, principalmente a ductilidade e a resistência ao choque. O Mo também reduz a tendência que certos aços com cromo possuem de fragilidade ao revenido. Devido a sua boa resistência a fluência, esses aços tem sido empregados em condições de trabalho a temperaturas elevadas [3].

Tabela 2.2 - Elementos de liga e suas funções principais.

Elementos	Principais Funções
Cr	1-Aumenta a resistência à oxidação e a corrosão 2-Aumenta a endurecibilidade 3-Melhora a resistência a altas temperaturas 4-Resiste ao desgaste (com alto C)
Mo	1-Eleva a temperatura de crescimento de grão de austenita 2-Produz maior profundidade de endurecimento. 3-Contrabalança a tendência de fragilidade do revenido 4-Eleva a dureza a quente, a resistência a quente e a fluência. 5-Melhora a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis 6-Forma partículas resistentes à abrasão

Este aço tem como uma de suas aplicações principais a fabricação de tubos que são utilizados para altas temperaturas de trabalho e que exigem resistência à fluência ou para aplicações que exigem resistência a oxidação e a corrosão [3].

Algumas das aplicações destes tubos são em fornalhas e fornos, radiadores para indústrias químicas e de refino de petróleo, em caldeiras, aquecedores e em aplicações similares.

Para a determinação das propriedades mecânicas do aço em regime de curta duração em altas temperaturas utiliza-se basicamente a norma ASTM E-21 [4] de ensaios de tração a quente.

O Limite de escoamento e a Resistência à Tração do aço sofrem alterações com relação ao tratamento térmico sofrido pelo material. Na Tabela

2.3 temos a classificação do aço com relação aos tratamentos térmicos mais comumente empregados.

Em altas temperaturas o material pode sofrer mudanças estruturais, sensíveis à composição e ao tratamento térmico, resultando em diferentes níveis de deformação. Os materiais recozidos exibem um aumento do Limite de Escoamento em temperaturas intermediárias, sendo isso característico de materiais que exibem Envelhecimento Dinâmico por Deformação (EDD).

Materiais normalizados e revenidos bem como os que passam por um processo de têmpera e revenimento quase não exibem Endurecimento Dinâmico por Deformação, tendo um aumento pequeno no Limite de Escoamento em temperaturas intermediárias.

Tabela 2.3 - Classificação do aço 2,25Cr-1Mo com relação aos diferentes tratamentos térmicos.

Classificação do Aço Com Base Nos Tratamentos Térmicos	
Categoria - 1	Todos os materiais recozidos qualquer que seja o nível de resistência, e os normalizados e revenidos que tem uma resistência à tração na temperatura ambiente < 517,24 MPa
Categoria - 2	Os materiais normalizados e revenidos que têm uma resistência à tração na temperatura ambiente > 517,24 MPa, (especificação 387, grau D da ASTM).
Categoria - 3	Materiais revenidos que têm uma resistência à tração na temperatura ambiente < 793,1 MPa, (especificação 542, Classe 1 e 3 da ASTM).
Categoria - 4	Materiais que sofreram tratamentos térmicos de tempera e revenido que tem uma resistência a tração na temperatura ambiente >= 793,1MPa (especificação 542, Classe 2 da ASTM).

2.2- O Ensaio de Tração

2.2.1- A Curva Tensão versus Deformação.

Os ensaios de tração são amplamente utilizados visando à obtenção de informações básicas sobre o comportamento mecânico do material. Neste tipo

de teste submete-se o corpo de prova a uma velocidade de tração constante (com velocidade do travesso constante ou taxa de deformação constante) enquanto são feitas observações da variação do seu alongamento. Ao se realizar ensaios de tração em materiais metálicos, diferentes comportamentos podem ser notados [5].

A Figura 2.1 mostra uma curva esquemática de tração obtida com velocidade constante do travessão ao se ensaiar um aço de baixo teor de carbono no estado recozido, à temperatura ambiente.

O formato da curva Tensão-Deformação de um metal depende da sua composição, tratamento térmico, histórico anterior de deformação plástica, taxa de deformação, temperatura e estado de tensões impostas durante o ensaio [5].

Nesta curva, na região elástica, a tensão é proporcional à deformação, valendo a Lei de Hooke [5].

Após a região elástica, tem-se a região de plasticidade não uniforme que ocorre quando uma tensão suficientemente alta libera eventualmente algumas discordâncias que se encontram ancoradas por átomos de solutos. Essas discordâncias podem se mover com uma tensão menor e também gerar novas discordâncias móveis. A região de deformação plástica não uniforme localizada que surge no corpo de prova é chamada de Banda de Lüders e esta se propaga ao longo da parte útil amostra [6]. Varias bandas desse tipo podem ocorrer nessa região, cada uma provocando o aparecimento de um pico na região de escoamento.

Quando a carga ultrapassa a região de escoamento, o corpo de prova sofre deformação plástica generalizada uniforme. Nessa região, para que se possa ter uma maior deformação plástica é necessário que se aumente a tensão. Isso ocorre em razão do fenômeno de encruamento que se intensifica no material [8].

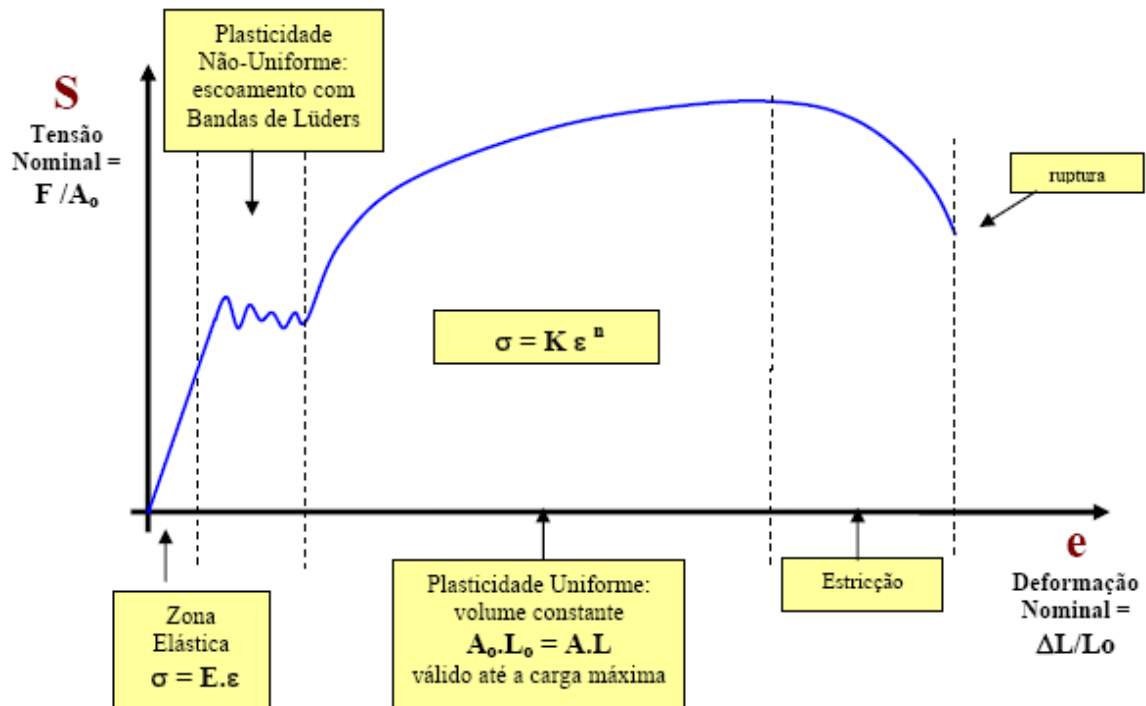


Figura 2.1 Curva esquemática Tensão Nominal versus Deformação Nominal em um ensaio de tração com velocidade constante de travessão.

Prosseguindo com o alongamento se tem uma redução da seção reta transversal do corpo de prova. Se durante a deformação plástica o volume do corpo de prova permanecer constante, vale a Equação 2.1:

$$A \cdot L = A_0 \cdot L_0 \quad (2.1)$$

Na região de plasticidade uniforme apresentada na Figura 2.1, até o ponto de carga máxima, valem as seguintes relações entre tensão verdadeira e tensão nominal (Equação 2.2) e deformação verdadeira e deformação nominal (Equação 2.3):

$$\sigma = S (1 + e) \quad (2.2)$$

$$\varepsilon = \text{Ln} (1 + e) \quad (2.3)$$

onde: σ = tensão verdadeira

S = tensão nominal

ε = deformação verdadeira

e = deformação nominal

Dois fenômenos importantes podem ser observados quando se tracionam os sólidos com velocidade constante: o fenômeno de encruamento e o fenômeno de sensibilidade da tensão com a taxa de deformação.

2.2.2 O Fenômeno do Encruamento e da Sensibilidade à Taxa de Deformação.

a) O fenômeno de encruamento (strain hardening) corresponde ao endurecimento (aumento da resistência) ocasionado pela própria deformação introduzida no corpo de prova. Este fenômeno pode ser em geral bem representado pela equação de Ludwik [5] (Equação 2.4):

$$\sigma = \sigma_0 + K' \varepsilon^{n'} \quad (2.4a)$$

onde:

σ_0 - tensão inicial para ocorrência de plasticidade.

K' - Coeficiente de Resistência

n' - Expoente de Encruamento, com o valor de $0 \leq n' \leq 1$.

Uma forma mais simplificada da Equação de Ludwik [5], bastante utilizada na prática (recomendada pela Norma ASTM E-646), considera que $\sigma_0 = 0$, ficando reduzida à seguinte expressão:

$$\sigma = K' \varepsilon^{n'} \quad (2.4b)$$

Quando um metal encrua, ele tende a aumentar a sua capacidade de suportar o carregamento mediante o aumento da deformação. A diminuição gradual da área da seção reta transversal do corpo de prova se opõe ao aumento da capacidade de suportar carregamento em virtude do efeito do aumento do alongamento.

O empescoçamento (ou deformação localizada, ou estrição) tem início no ponto de carga máxima (Figura 2.1), quando o aumento da tensão devido à diminuição da área da seção reta transversal do corpo de prova torna maior com aumento da capacidade do metal em suportar o carregamento devido ao

encruamento [7].

b) O fenômeno de sensibilidade da tensão com a taxa de deformação representa o aumento da resistência à medida que se deforma o material com velocidades cada vez maiores. O valor de m' varia com a temperatura, com a estrutura do material e com a taxa de deformação. Este fenômeno é representado pela Equação 2.5:

$$\sigma = C' \dot{\epsilon}^{m'} \quad (2.5)$$

onde: C' - Coeficiente de Sensibilidade à Taxa de Deformação.

m' - Expoente de Sensibilidade à Taxa de Deformação.

com o valor de $0 \leq m' \leq 1$

A Figura 2.2 mostra esse comportamento para o aço 2,25Cr-1Mo ensaiado a 700°C [10].

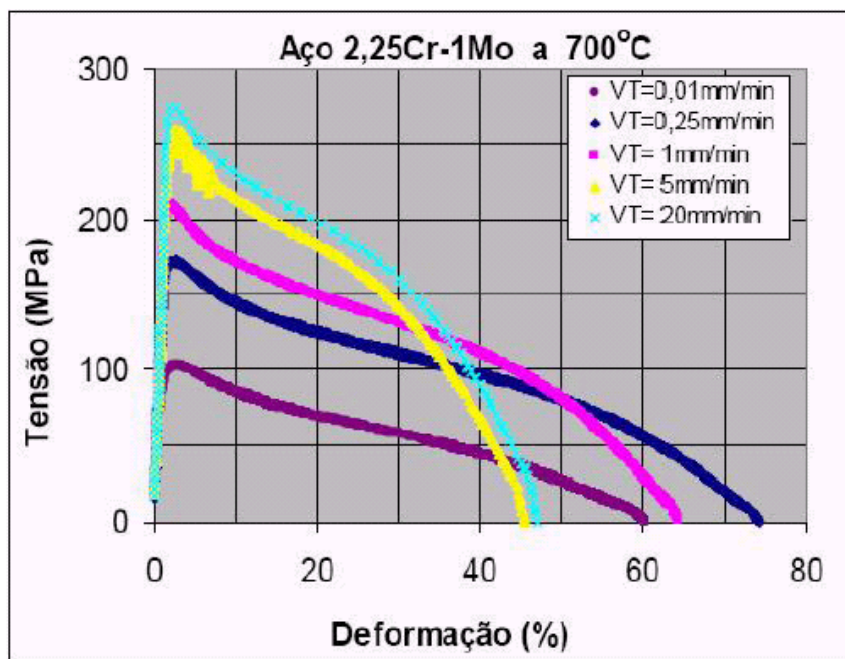


Figura 2.2 Comportamento do aço 2,25Cr-1Mo a 700°C exibindo sensibilidade à taxa de deformação [10].

Esse fenômeno pode ocorrer em uma vasta gama de materiais em vários níveis de temperatura. Nos metais ele ocorre de maneira mais acentuada em temperaturas elevadas, para $T > 0,5T_f$ (T_f = temperatura absoluta de fusão do metal).

Em certas condições de ensaio, dependendo da faixa de tensão e da temperatura utilizada, é possível se sintetizar o comportamento com relação ao encruamento e sensibilidade à taxa de deformação em termos de uma única expressão, como mostra a Equação 2.6.

$$\sigma = K' \cdot \varepsilon^{n'} \cdot \dot{\varepsilon}^{m'} \quad (2.6)$$

Quando o valor de m' tende a zero (baixa sensibilidade à taxa de deformação), a equação acima assume a forma da Equação 2.4b, ou seja, o comportamento fica dominado pelo fenômeno de encruamento. À medida que o valor de n' tende a zero (baixo nível de encruamento), a equação acima assume a forma dada pela Equação 2.5 e o comportamento passa a ser dominado pelo fenômeno de sensibilidade à taxa de deformação.

A análise da variação do valor de n' e m' para os valores entre 0 e 1 fornece informações sobre os diferentes comportamentos dos materiais com relação ao encruamento e a taxa de sensibilidade à deformação.

Quando $n' = 0$, temos $\sigma = K' \cdot \varepsilon_0 = K'$, ou seja, quando o material entra na região plástica, a deformação ocorre o tempo todo a tensão constante, apresentando o comportamento semelhante ao de um material que apresenta escoamento viscoso Newtoniano (característica mais próxima dos polímeros). Já para $n' = 1$, $\sigma = K' \cdot \varepsilon^1 = K' \cdot \varepsilon$ ou seja, o material entra na região plástica com um comportamento semelhante ao da região elástica, apresentando comportamento frágil (característica mais próxima das cerâmicas).

Os metais exibem um comportamento intermediário, devido a sua estrutura cristalina, exibindo curvas com características intermediárias entre materiais frágeis e dúcteis como mostra a Figura 2.3.

À temperatura ambiente, os aços e ligas de alta resistência apresentam curvas de tração dominadas pelo fenômeno de encruamento. Porém, à medida que a temperatura aumenta, o encruamento decresce e os fenômenos de sensibilidade à taxa de deformação começam a se intensificar. Esses dois fenômenos agem em sentidos opostos, de tal forma que à medida que se eleva a temperatura, decresce o valor de n' e aumenta o valor de m' .

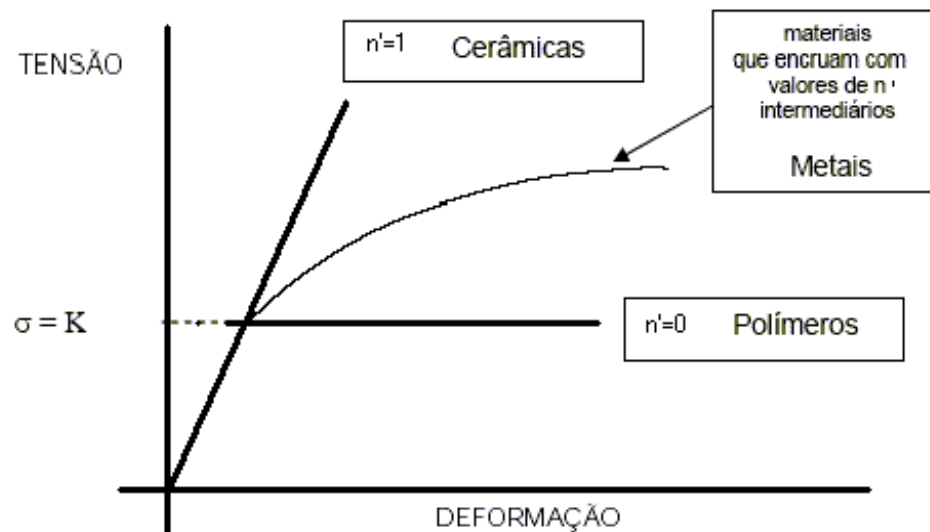


Figura 2.3 Comportamento Elástico - Plástico dos materiais com n' variando de 0 a 1.

Este fato está ilustrado na Figura 2.4 que apresenta de forma esquemática as variações de n' e m' encontradas nos dados experimentais obtidos para o aço 2,25Cr-1Mo, na temperatura ambiente e na faixa de 500 a 700°C, como sugerido por Bueno et al [8] e Reis Sobrinho et al [9].

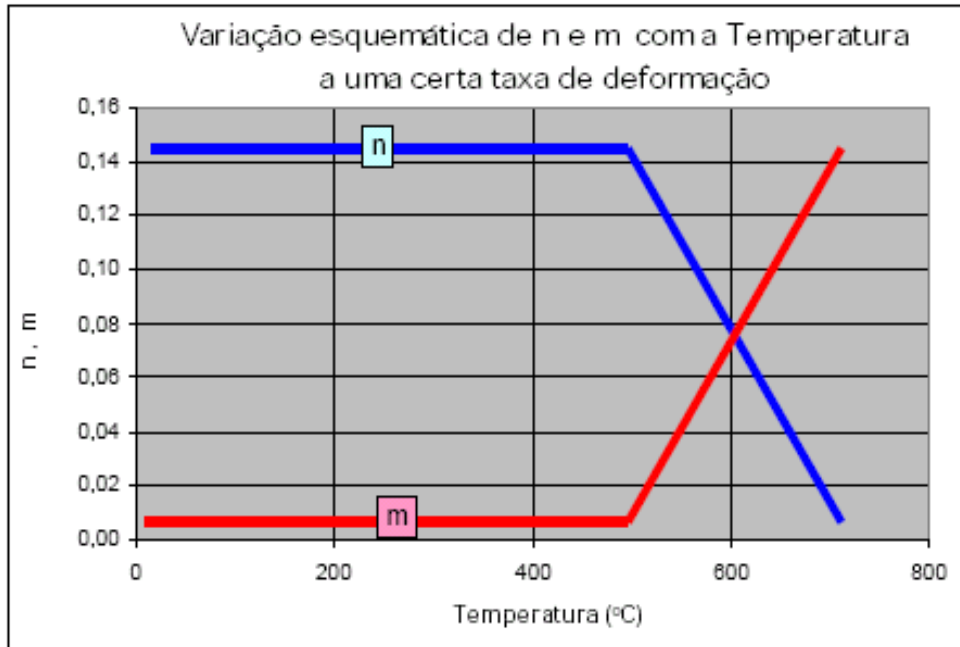


Figura 2.4 Gráfico comparativo esquemático dos valores de n' e m' em função do aumento da temperatura, para o aço 2,25Cr-1Mo, como sugerido por Bueno et al [8] e Reis Sobrinho et al [9].

Os fenômenos decorrentes da sensibilidade à taxa de deformação se acentuam em altas temperaturas. Ensaio em temperaturas elevadas fazem decrescer também o módulo de elasticidade, a tensão de escoamento, o limite de resistência, aumentando a ductilidade do material.

Com o aumento da temperatura tem-se o decréscimo da capacidade de encruamento.

Como $n' \sim \epsilon_u$ (ϵ_u = deformação verdadeira no ponto de carga máxima) [5], o ponto de carga máxima deve ocorrer para valores de deformação nominal cada vez menores.

Outros fenômenos podem surgir no material em virtude da sensibilidade da resistência com a taxa de deformação, que são na realidade decorrentes do aumento da taxa de difusão dos átomos, com o aumento da temperatura.

Consideremos o que acontece no ponto de carga máxima quando um material apresenta sensibilidade à taxa de deformação, segundo a Equação 2.5:

$$\sigma = C' (\dot{\epsilon})^{m'} \quad (2.5)$$

Como $\sigma = P/A = AR/AL$, a Equação 2.5 pode ser escrita:

$$P/A = \sigma = C' (\dot{\epsilon})^{m'} \quad (2.6)$$

ou
$$\dot{\epsilon} = (P/C')^{1/m'} \cdot (1/A)^{1/m'} \quad (2.7)$$

Mediante a condição de que o volume do corpo de prova permanece constante durante a deformação plástica (Equação 2.1), temos que:

$$\dot{\epsilon} = 1/L \, dL/dt = -1/A \, dA/dt$$

Fazendo-se a substituição das variáveis, temos a expressão final:

$$-dA/dt = (P/C')^{1/m'} (1/A)^{(1-m')/m'} \quad (2.8)$$

A Figura 2.5 ilustra esquematicamente como varia a velocidade de redução de área na parte útil do corpo de prova para diferentes valores de m' , segundo a Equação 2.8. O gráfico mostra que quando $m' = 1$ a deformação é do tipo viscosa newtoniana e neste caso, qualquer variação mínima de área que venha a ocorrer na parte útil do corpo de prova será preservada durante o alongamento, não ocorrendo estrição catastrófica que leve à fratura.

No entanto, quando $m' < 1$, quanto menor for a área transversal, maior será a velocidade de redução dessa área, o que pode ser comprovado pela análise da Figura 2.5.

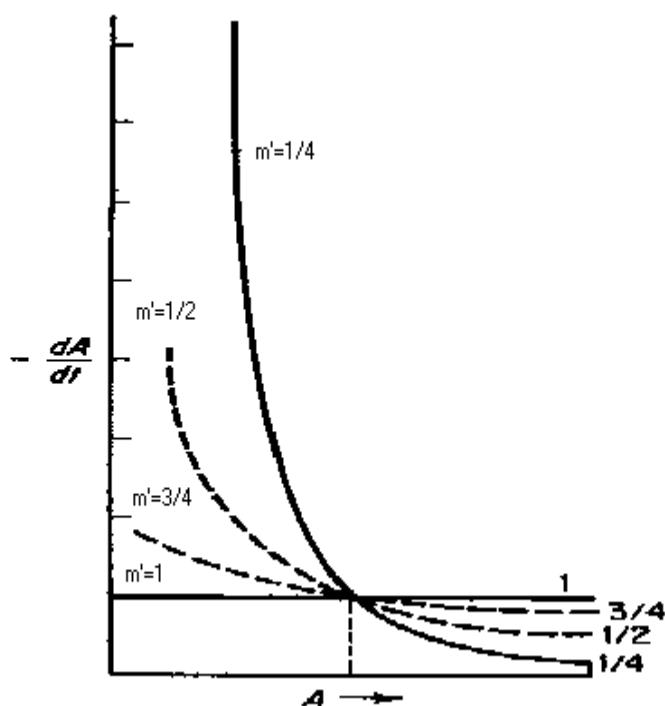


Figura 2.5 Variação da velocidade de redução de área com a área transversal do corpo de prova para diferentes valores de m' .

À medida que m' diminui, ocorre um aumento na velocidade de redução de área, de modo que se algum empescoçamento surgir para baixos valores de m' , este será catastrófico, levando irreversivelmente à fratura do corpo de prova. Isso é o que acontece nos ensaios de tração à temperatura ambiente dos materiais metálicos de um modo geral, quando o encruamento domina o processo de deformação.

Com o aumento da temperatura, os efeitos de encruamento são aliviados e o material passa a ser sensível à taxa de deformação, devido aos fenômenos de recuperação microestrutural (queda de n' e aumento de m').

Assim, verifica-se que o Expoente de Sensibilidade da Tensão com a Taxa de Deformação (m') tem um notável efeito no formato da curva de tração, depois do ponto de carga máxima, ou seja na região de empescoçamento do material. Portanto, o fenômeno de encruamento determina o comportamento da curva de tração antes do ponto de carga

máxima, enquanto que o fenômeno de sensibilidade da tensão com a taxa de deformação determina o comportamento da curva de tração depois da ocorrência do ponto de carga máxima.

O Expoente de Sensibilidade à Taxa de Deformação representa um bom indicativo da velocidade de movimentação das discordâncias que é depende da tensão aplicada.

A sensibilidade à taxa de deformação pode ser baixa em metais à temperatura ambiente, porém em outros materiais pode apresentar valores apreciáveis. Alguns metais e ligas que possuem elevada sensibilidade à taxa de deformação podem apresentar superplasticidade, fenômeno que se refere ao aparecimento de alongamentos acima de 300%, podendo chegar em alguns casos até 2000% [5]. Metais superplásticos apresentam um tamanho de grão ou espaço interfásico da ordem de $1\mu\text{m} - 5\mu\text{m}$ e estrutura duplex. Nota-se que quando os metais são testados a altas temperaturas e baixas taxas de deformação, ocorre um acentuamento do comportamento superplástico.

Durante os ensaios de tração a quente podem ocorrer mudanças estruturais como transformações de fases, precipitação de partículas, envelhecimento por deformação, fenômeno de recuperação ou recristalização em faixas específicas de temperatura, ocasionando mudanças no comportamento de resistência mecânica do material.

O aumento da temperatura provoca em geral uma diminuição na tensão de escoamento, porém esse comportamento difere entre os materiais em virtude da sua dependência com a subestrutura de discordâncias, que sofre modificações com o aparecimento de efeitos de interação com diferentes átomos de solutos, precipitados e outros detalhes microestruturais.

O aço 2,25Cr-1Mo pode sofrer mudanças estruturais em faixas específicas de temperatura, que provocam diferenças na sensibilidade que o material apresenta com relação à temperatura e à taxa de deformação.

2.2.3 Efeito de Envelhecimento Dinâmico por Deformação

Quanto ao comportamento da curva σ versus ϵ para o aço 2,25Cr-1Mo, nota-se que quando o material é ensaiado à temperatura ambiente ele pode apresentar um escoamento nítido, que é indicativo do comportamento de um material no estado recozido ou revenido, em decorrência do fenômeno de Envelhecimento por Deformação (ED).

O envelhecimento por deformação provoca um escoamento descontínuo, com aumento do limite de escoamento, diminuição da ductilidade e um baixo valor da sensibilidade à taxa de deformação. Este efeito está associado ao aparecimento do fenômeno do serrilhado, denominado de efeito Portevin-Le-Chatelier [11] (EPLC) para temperaturas e tensões específicas, o que corresponde ao efeito do Envelhecimento Dinâmico por Deformação (EDD).

O serrilhado é decorrente dos sucessivos escoamentos enquanto o corpo de prova esta sendo deformado. Nesse caso, quando a velocidade das linhas de discordâncias é suficientemente lenta, elas se tornam capazes de se mover arrastando uma atmosfera de impurezas. Porém quando a velocidade de movimentação é maior que um determinado valor, as discordâncias saem da atmosfera causando uma queda no escoamento.

Desde que a mobilidade dos átomos de soluto seja alta nas temperaturas de ocorrência do escoamento descontínuo, novos átomos movem-se para as discordâncias e as bloqueiam.

O intervalo de temperatura na qual ocorre o escoamento descontínuo é conhecido por fragilização azul, porque nesta temperatura tem-se um decréscimo da ductilidade e da resistência ao impacto.

Portanto nesta temperatura também ocorre uma sensibilidade mínima à taxa de deformação e um grau de envelhecimento por deformação máximo.

Na investigação dos efeitos da temperatura e da taxa de deformação nas propriedades mecânicas tem-se observado a ocorrência da deformação

plástica com serrilhado no comportamento do aço 2,25Cr-1Mo, que é um indicativo da ocorrência do fenômeno do Envelhecimento Dinâmico por Deformação, que é influenciado pela faixa de temperatura de trabalho e pela velocidade de tração.

Quando se busca a obtenção da energia de ativação dos materiais sujeitos ao processo de Envelhecimento Dinâmico por Deformação, observa-se que este é causado pela interação entre átomos de soluto específicos com as discordâncias, estes átomos de soluto podem ser diferentes dependendo da faixa de temperatura na qual o corpo de prova está sendo ensaiado.

É necessária a ocorrência da ativação de um grande número de discordâncias ao mesmo tempo para que se tenha a instabilidade plástica observada no EPLC [11]. Outra explicação sugerida para o fenômeno está na queda da velocidade média das discordâncias para um valor crítico, fato este que pode ser decorrente da interação das discordâncias com os átomos de soluto [11].

O serrilhado encontrado pode apresentar duas formas: O tipo A e o tipo B conforme ilustra a Figura 2.6.

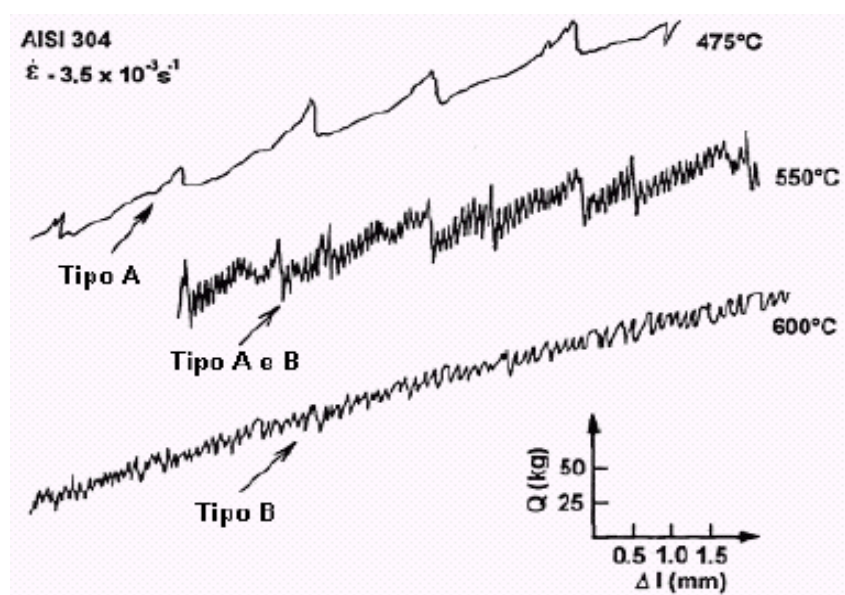


Figura 2.6: Tipos de serrilhado, durante a tração a quente.

Estudos do modelamento numérico do EPLC conforme McCormick [12] tem demonstrado que as principais características do escoamento com serrilhado podem ser simuladas mecanisticamente, demonstrando uma excelente concordância com as medidas experimentais. Uma série de modelos e micromecanismos podem ser utilizados na busca de explicações para o fenômeno [13]. Observa-se que o volume de ativação e a energia de ativação para deformação plástica são funções da temperatura e sofrem um incremento com o aumento da mesma [14]. Para o fenômeno do endurecimento dinâmico por deformação, nota-se que a deformação plástica com serrilhado para uma determinada faixa de temperatura pode apresentar até uma taxa de sensibilidade à tensão (valor de m') negativa em virtude do travamento das discordâncias com os átomos de soluto na liga [14].

2.3 O Fenômeno de Fluência

A deformação progressiva de um material sob tensão constante é chamada de fluência, que considera a variação dimensional que ocorre no corpo de prova com o tempo, devido à exposição a temperaturas elevadas [5].

Em virtude da influência ocasionada pela temperatura nos ensaios de fluência esta se divide em: fluência difusional (englobando a fluência de Coble, Nabarro-Herring e Harper-Dorn) e a fluência por movimentação de discordâncias, que serão apresentadas a seguir.

2.3.1 Curva Convencional de Fluência

A determinação da curva de fluência de um material ocorre pela aplicação de uma carga ou tensão ao corpo de prova que permanece constante durante todo o ensaio, a uma dada temperatura [15]. A Figura 2.7 apresenta uma curva típica de fluência.

A inclinação da curva em qualquer ponto é a velocidade de fluência ou taxa de fluência ($d\varepsilon/dt$). A curva possui três estágios, sendo o primeiro estágio,

denominado de fluência primária, onde a velocidade de fluência diminui com o tempo. Neste estágio a resistência do material à fluência aumenta devido a sua própria deformação, ou seja, devido ao fenômeno de encruamento, sendo que para temperaturas baixas e tensões altas, a fluência primária é um processo predominante.

Quando a velocidade de fluência permanece aproximadamente constante com o tempo temos o segundo estágio, chamado de fluência secundária ou estacionária. Para este estágio ocorre uma competição entre os mecanismos de encruamento e recuperação da subestrutura das discordâncias formada no material.

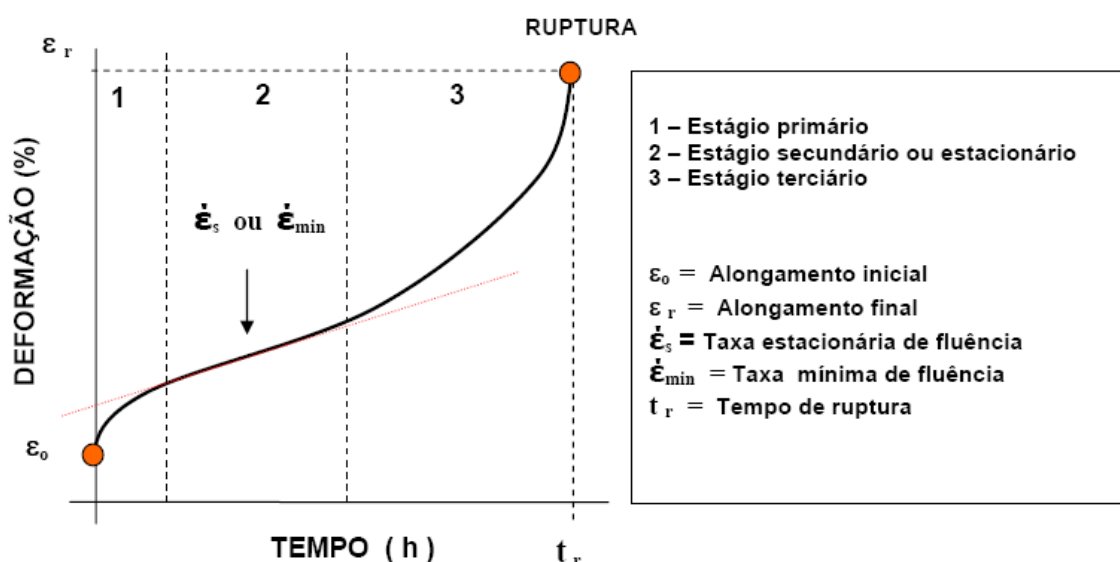


Figura 2.7 Curva típica de ensaio de fluência a carga constante apresentando os três estágios de deformação.

No terceiro estágio a velocidade de fluência aumenta rapidamente com o tempo até que ocorra a fratura do material. Este estágio ocorre com maior predominância nos ensaios de fluência a carga constante comparados aos de tensão constante, estabelecendo-se com maior antecedência em altas tensões e temperaturas elevadas.

O estágio terciário está freqüentemente associado com diversas variações metalúrgicas que ocorrem simultaneamente devido à recuperação subestrutural, coalescimento de partículas de precipitados, recristalização ou mudanças nas fases presentes no material [16,17 e 18], podendo ocorrer uma grande redução da secção transversal do corpo de prova pela formação, crescimento e interligação de vazios internos e eventualmente formação de pescoço próximo ao momento de ruptura.

Dependendo do nível de tensão aplicada, a deformação inicial ϵ_0 sofrida pelo corpo de prova logo na ocasião da aplicação de carga (mostrada na Figura 2.7) pode ser constituída de deformação elástica e também plástica. O fenômeno de fluência poderá ocorrer mesmo se a tensão aplicada estiver abaixo do limite de escoamento do material, ou seja, quando ϵ_0 for constituído apenas pela deformação elástica.

A curva de fluência pode não conter todos os estágios demonstrados na Figura 2.7, dependendo das condições de temperatura e tensão que estejam sendo utilizadas e principalmente de certos efeitos de instabilidade microestrutural que ocorram durante o ensaio.

2.3.2 Principais Mecanismos de Fluência

A) Fluência Difusional

A fluência difusional ocorre pelo transporte de átomos de uma região para outra do cristal sob efeito de um gradiente de tensão (em geral das zonas sob compressão para as zonas sob tração), sem participação do movimento de discordâncias. Destacam-se três mecanismos principais desse tipo, a saber:

i) Fluência de Nabarro-Herring

A altas temperaturas tem-se a difusão de vacâncias no interior do grão, o que conduz ao mecanismo de fluência de Nabarro-Herring [18, 19, 20].

As teorias esclarecem a dependência que as mudanças dimensionais de um sólido policristalino tem com a inclusão do transporte difusional de átomos, causando mudanças de forma e reorientação da estrutura cristalina granular.

Quando o metal é solicitado, as vacâncias fluem do campo de tração, para o campo de compressão, resultando em uma difusão de átomos em sentido contrário.

A continuidade da transferência de vacâncias e o contrafluxo dos átomos são dependentes do tempo e da tensão aplicada [19].

ii) Fluência de Coble

Coble [21] estabeleceu as bases do mecanismo de fluência difusional, que ocorre pela difusão de vacâncias, ao longo dos contornos de grão. A teoria original desenvolvida por Nabarro-Herring [19,20], considera que a difusão ocorre apenas no reticulado cristalino.

No mecanismo proposto por Coble [21] a deformação resulta do processo de difusão, cuja trajetória preferencial situa-se ao longo dos contornos de grão. O mecanismo de Coble [21] pode atuar simultaneamente com o de Nabarro-Herring [19,20], e a taxa de fluência resultante corresponde à soma das contribuições.

A fluência tipo Nabarro-Herring predomina em condições de temperaturas elevadas ($T > 0.7T_f$), apresentando uma dependência do tipo $1/d^2$, ao passo que Coble predomina preferencialmente em temperaturas mais baixas ($0.4T_f < T < 0.7T_f$) apresentando uma dependência do tipo $1/d^3$ [22].

A Figura 2.8 ilustra a direção do fluxo de vacâncias conforme previsto pelos modelos de Nabarro-Herring [19,20] (interior do cristal) e Coble [21] (ao longo dos contornos de grão).

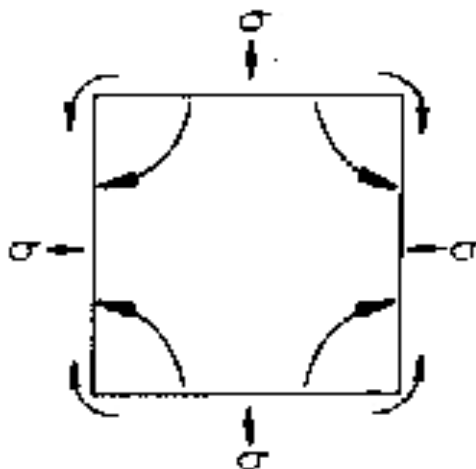


Figura 2.8 Fluxo de vacâncias com base na teoria de Nabarro-Herring [19,20] e Coble [21].

lii) Fluência de Harper-Dorn

Este mecanismo proposto por Harper-Dorn [23] consiste basicamente na migração de vacâncias através do núcleo de discordâncias em cunha, paralelas ao vetor de Burgers e com a tensão axial perpendicular ao vetor. A taxa de deformação é proporcional à tensão e à densidade das discordâncias, sendo independente do tamanho do grão [22]. O processo ocorre na rede cristalina e não há acúmulo de matéria no contorno de grão.

A teoria dos defeitos apresentada na fluência Harper-Dorn [23] é observada a altas temperaturas em muitos metais, com a formação de arranjos de discordâncias. Devido aos longos segmentos de discordâncias situados nos planos de deslizamento, pode não ocorrer deslizamento devido à rápida multiplicação de discordâncias que restringe o deslizamento, contudo a aplicação de uma tensão elevada nos planos pode ativar a movimentação das discordâncias por degraus [16].

O modelo de Harper-Dorn tem sido motivo para muitas discussões e induz provavelmente a processos transientes que ocorrem com longas durações.

B) Fluência por Deslizamento do Contorno de Grão

Na fluência a temperaturas elevadas não se tem dúvida de que os grãos policristalinos podem deslocar-se em relação a outros grãos adjacentes. Este deslocamento pode ser registrado com facilidade usando-se linhas marcadas, possibilitando a sua medição e análise, por meio do desvio superficial associado com o deslizamento do contorno de grão.

A importante característica das medidas de deslizamento do contorno de grão é reter a essência original do contorno grão, mesmo com altas deformações ao longo de uma tensão axial.

Neste caso a ductilidade e a superplasticidade, são exemplos clássicos da ocorrência do deslizamento do contorno de grão.

As considerações de Rachinger [17] revelam que o deslizamento em material policristalino não pode ocorrer sem que haja acomodação adicional de grãos.

O deslizamento de Rachinger [17] promove a acomodação do deslizamento dentro do grão, sendo demonstrado experimentalmente que as taxas de deslizamento são controladas ao longo do contorno de grão e que as discordâncias são capazes de mover entre os grãos adjacentes acomodados no processo.

Os processos de acomodação das discordâncias que se movem dentro de grãos adjacentes e colidem com os subcontornos de grão formados durante a fluência, induzem as taxas de deslizamento controladas pela taxa de escalagem, e pelo avanço das discordâncias dentro do contorno dos subgrãos. Entretanto as considerações para materiais com grãos muito pequenos demonstram que não há formação de subgrãos e que a taxa de deslizamento também é controlada pela taxa de escalagem.

A Figura 2.9a ilustra o deslizamento em grãos grosseiros com movimentação de discordâncias sobre os contornos de grão e o bloqueio do deslizamento na borda A, além da acomodação da movimentação das discordâncias nos grãos adjacentes e a formação de empilhamentos nos contornos dos subgrãos [20].

Para grãos muito pequenos, a ocorrência do deslizamento abaixo do grão B conduz a acomodação em C, com tensão concentrada na junta tríplice D.

A acomodação da movimentação das discordâncias se dá pelo deslizamento cruzado e escalagem em oposição ao contorno de grão, como mostra a Figura 2.9b [19].

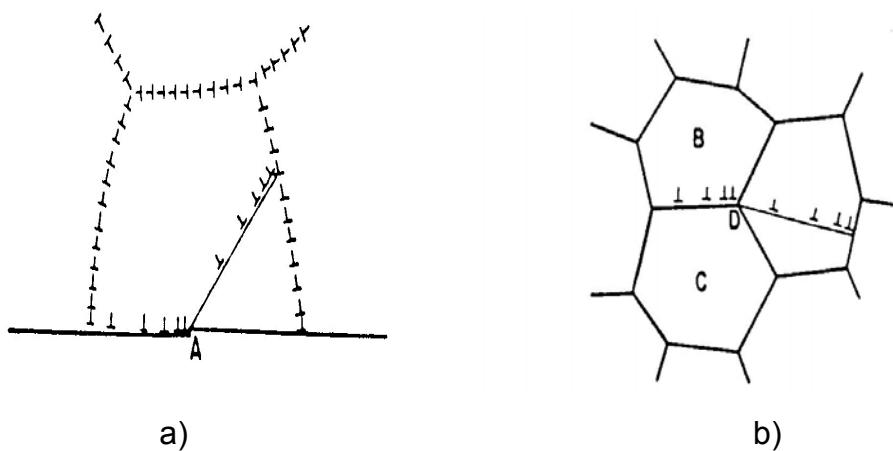


Figura 2.9 Princípio do deslizamento do contorno de grão: a) fluência convencional [19]; b) superplasticidade [19].

C) Fluência por Movimentação de Discordâncias

As propriedades decorrentes da fluência de materiais cristalinos dependem fortemente dos mecanismos de deslizamento e escalagem. A fluência comporta-se com base no fluxo do estágio estacionário e das características microestruturais dos materiais puros. A deformação plástica que ocorre nos metais cristalinos depende da presença de defeitos na estrutura dos cristais e estes se dividem em:

- (i) Defeitos de ponto, dentre eles as vacâncias.
- (ii) Defeitos de linha ou discordâncias.
- (iii) Defeitos planares, como os dos contornos de grão.
- (iv) Defeitos volumétricos, tais como partículas de precipitados e vazios.

Os ensaios de tração são usualmente conduzidos em taxas de deformação constantes a baixas temperaturas, onde a deformação plástica ocorre unicamente por movimentação de discordâncias.

Em temperaturas elevadas, os ensaios de fluência são realizados geralmente com tensão ou carga constante, o que possibilita uma taxa de difusão suficientemente rápida para que a deformação plástica possa ocorrer apenas por difusão de vacâncias na direção da tensão.

A difusão por fluência tem importância quando realizada a baixas tensões e com taxa de deformação extremamente lenta para o tamanho do grão pequeno. Quando a fluência se dá em condições normais, a taxa de deformação é razoavelmente rápida, e a deformação é atingida novamente por movimentação de discordâncias dentro da rede cristalina. Portanto as discordâncias desempenham um papel de grande importância na deformação plástica dos materiais cristalinos, sendo uma grande fonte de estudos.

Para alguns materiais, a taxa de deformação obtida nos ensaios de fluência é dependente da tensão aplicada (σ), da temperatura absoluta em Kelvin (T), e do tamanho do grão (d). Sob condições de estado estacionário tem-se que a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$, permanece constante com o tempo.

2.3.3 Principais Relações e Parâmetros de Fluência

a) Equação geral de fluência

Em geral o fenômeno de fluência pode ser descrito por uma equação do tipo:

$$\dot{\epsilon}_s = A \cdot \sigma^n \cdot \exp(-Q_f / RT) \quad (2.9)$$

onde: A , n e Q_f são constantes dependentes do material

Dependendo dos mecanismos de deformação que atuam durante o processo de fluência tem-se diferentes valores para essas constantes.

b) Correlação entre mecanismos de fluência e os parâmetros n e Q_f

Os mecanismos de deformação por fluência variam de acordo com as faixas de temperatura e de tensão que são empregadas durante o ensaio, como mostrado na sessão 2.3.2.

Por exemplo, quando $n \sim 1$ o mecanismo de deformação dominante é o de transporte de átomos por difusão. É o processo que ocorre em baixas tensões e altas temperaturas, tornando-se mais intenso à medida que decresce o tamanho de grão do material. Os processos de difusão podem ocorrer através da rede cristalina (fluência Nabarro-Herring [22,23]) ou pelos contornos de grão (fluência Coble [24]) ou até mesmo através dos núcleos das discordâncias [fluência Harper-Dorn [25]]. Cada um desses processos apresenta um determinado tipo de dependência com o tamanho de grão do material.

Quando $n \sim 2$ o mecanismo principal é o de escorregamento de contornos de grãos [26].

Quando $n \sim 3$ o mecanismo dominante é o de deslizamento de discordâncias controlado por atrito viscoso na rede cristalina. É o processo principal de deformação em altas temperaturas que ocorre no caso de fluência de ligas com adição de elementos em solução sólida [26].

Quando $n \sim 5$ o mecanismo controlador é o de deslizamento de discordâncias controlado por escalagem. É o mecanismo principal no caso de fluência de metais puros e certos tipos de ligas com elementos de liga em solução sólida [26].

Quando $n > 5$ os mecanismos podem ser bem complexos, indicando fenômenos de interação de discordâncias com precipitados ou fases dispersas, formação de emaranhados de discordâncias ou subestruturas de discordâncias, enfim desenvolvimento de fatores microestruturais mais complexos que provocam o aparecimento de uma tensão interna no material.

A energia de ativação aparente assume valores próximos da energia de ativação para autodifusão nos metais, principalmente quando se trata de

fluência em metais puros, ou ligas com solução sólida simples. O valor da energia de ativação depende se a difusão se dá através da rede cristalina ou do contorno de grão. Quando a difusão se dá pelos contornos de grão, os valores são cerca de metade dos valores através da rede cristalina.

No caso de fluência de ligas metálicas complexas, que é o caso das ligas utilizadas tecnicamente em situações de engenharia, os valores de energia de ativação aparente de fluência podem ser bem maiores que os de auto-difusão do metal base da liga, chegando a atingir valores da ordem de 2 a 3 vezes maiores.

Esse fato se deve em grande parte ao acúmulo de tensão, que essas ligas apresentam durante o processo de fluência, que faz com que os valores de Q_f e n assumam valores aparentes bem altos, quando se analisa os dados apenas em termos do valor da *tensão aplicada* (σ_{apl}). Quando se conhece o nível de tensão interna (σ_i) e são utilizados na análise dos dados os valores efetivos de tensão (σ_{ef}) que realmente provoca o movimento das discordâncias $\sigma_{ef} = \sigma_{apl} - \sigma_i$, os valores de n e Q_f assumem valores mais próximos dos previstos nos modelos físicos do fenômeno de fluência para metais e ligas simples [26].

C) Análise de dados de fluência

Com os dados de σ , T , ϵ_0 , $\dot{\epsilon}_s$, t_r e ϵ_r podem ser preparados vários tipos de gráficos que possibilitarão um entendimento do comportamento de fluência do material.

Os quatro principais gráficos são os seguintes:

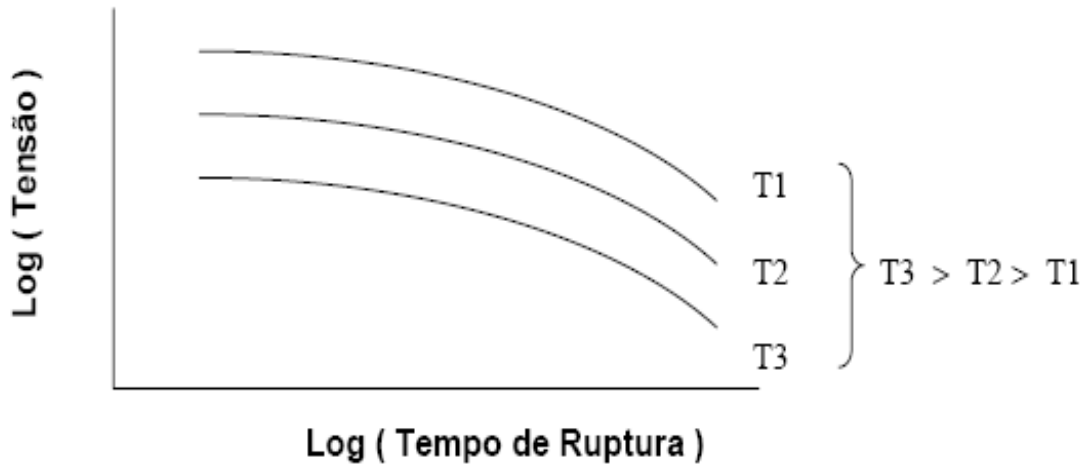


Figura 2.10 a) Gráfico Log (Tensão) x Log (Tempo de Ruptura), para dados em iso-temperatura.

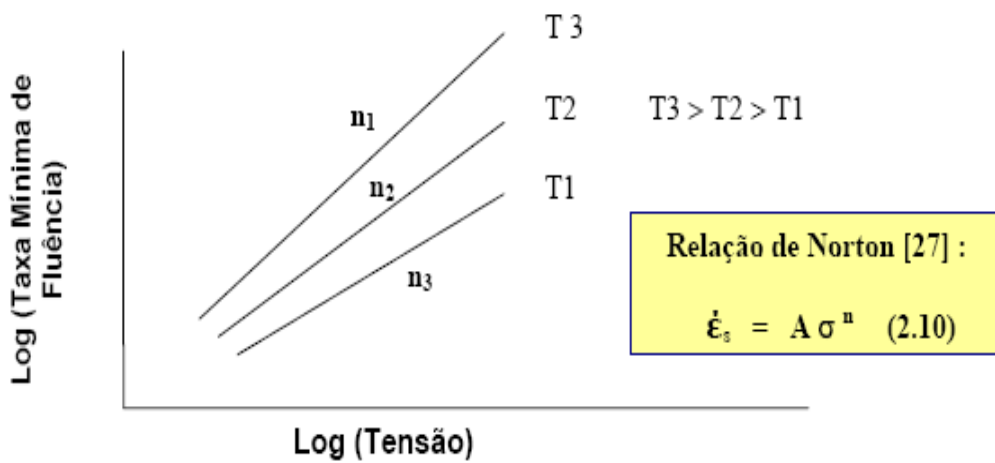


Figura 2.10 b) Gráfico Log (Taxa Mínima de Fluência) x Log (Tensão), para dados em iso-temperatura.

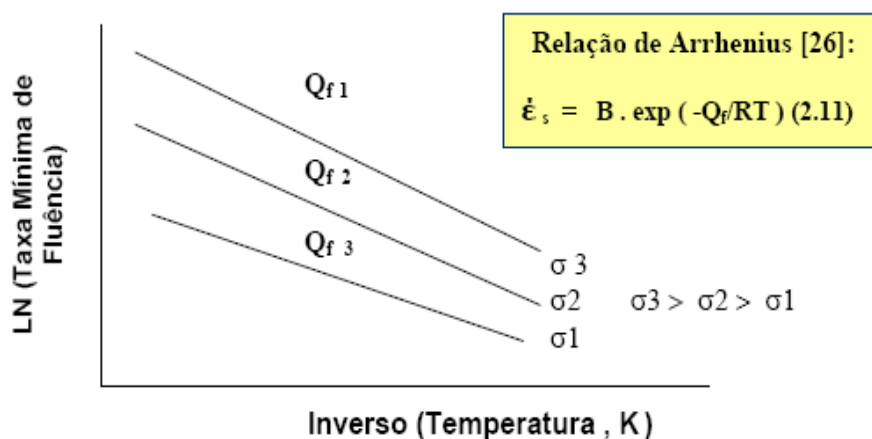


Figura 2.10 c) Gráfico LN (Taxa Mínima de Fluência) x Inverso (Temperatura Absoluta) , para dados em iso-tensão.

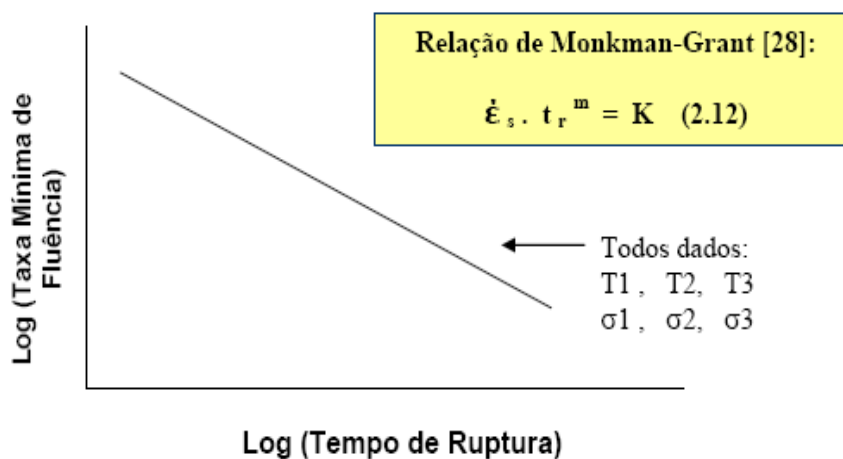


Figura 2.10 d) Gráfico Log (Taxa Mínima de Fluência) x Log (Tempo de Ruptura), para todos os dados de fluência (iso-temperatura e iso-tensão).

2.3.4 Métodos tradicionais de parametrização de resultados

Nesta parte do trabalho são apresentados métodos de parametrização dos ensaios de fluência que consistem na busca de equacionamentos dos dados.

a) Métodos baseados no aspecto dos dados de iso-tensão no plano $\text{Log}(t_r) \times 1/T$. Podem-se citar, por exemplo os métodos de: Larson–Miller [29], Orr-Sherby-Dorn[30], Goldhoff-Sherby [31], White-LeMay [32].

b) Métodos baseados no aspecto dos dados de iso-tensão no plano $\text{Log}(t_r) \times T$. Podem-se citar, por exemplo os métodos de: Manson-Haferd [33], Manson-Succop [34].

A seguir, será feita uma apresentação mais detalhada apenas de um dos principais métodos de cada uma dessas categorias, ou seja, de Larson Miller e Manson-Haferd que são inclusive recomendados para análise de dados desse tipo pela norma ASTM E-139 [35].

a) Método de Larson-Miller [29]: Este método considera que os dados de iso-tensão são linhas retas que convergem para um ponto focal situado na região negativa do eixo $\text{Log}(t_r)$.

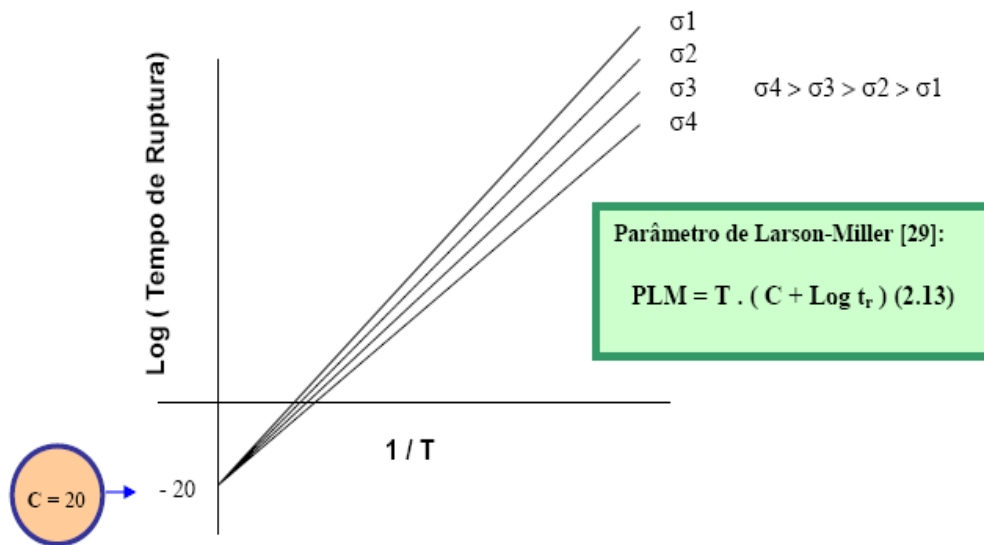


Figura 2.11 Padrão das linhas de iso-tensão no espaço $\text{Log}(t_r) \times 1/T$, segundo Larson-Miller [29].

Em geral, o valor de $C \approx 20$, mas pode variar de acordo com o sistema metálico em estudo.

O uso do parâmetro PLM no lugar de $\text{Log}(t_r)$ faz com que as curvas de $\text{Log}(\sigma) \times \text{Log}(t_r)$ que ficam separadas, colapsem em uma mesma curva de referência, como mostrado na figura abaixo:

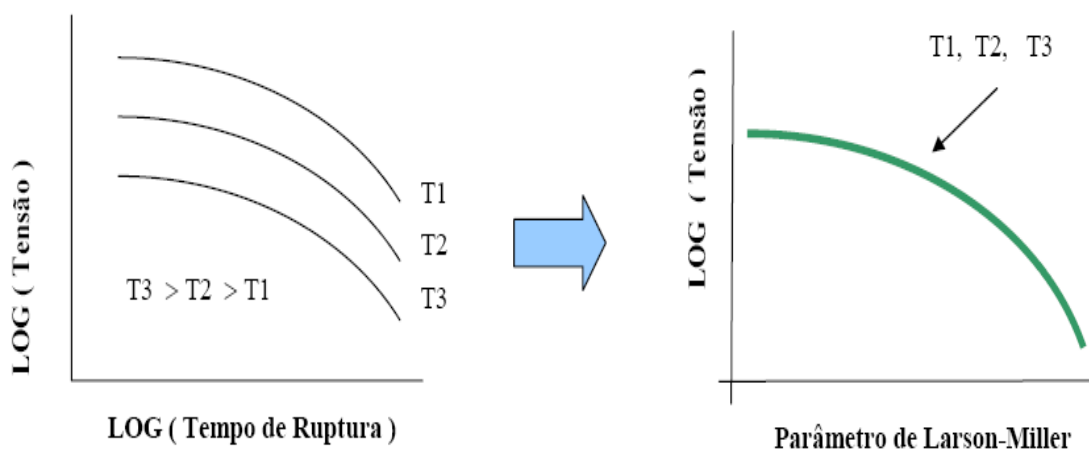


Figura 2.12 Conversão de uma família de dados $\text{Log}(\sigma) \times \text{Log}(t_r)$ em uma única curva de referência $\text{Log}(\sigma) \times P$, segundo o método de Larson-Miller [29].

Nota-se imediatamente que a curva paramétrica apresenta muito mais recursos para a interpolação e extrapolação de dados do que as curvas $\text{Log}(\sigma) \times \text{Log}(t_r)$ levantadas em cada nível de temperatura.

b) Método de Manson-Hafner [33]: Este método considera que os dados de iso-tensão são linhas retas que convergem para um ponto focal com coordenadas $[T_a, \text{Log}(t_a)]$.

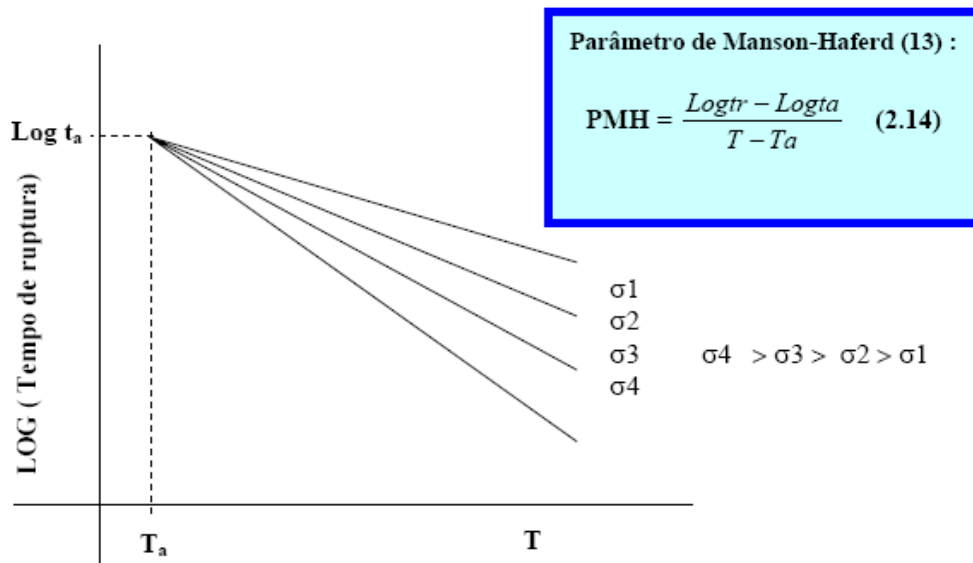


Figura 2.13 Padrão das linhas de iso-tensão no espaço $\text{Log}(t_r) \times T$, segundo Manson-Haferd [33].

O uso do parâmetro PMH no lugar de $\text{Log}(t_r)$ faz com que as curvas de $\text{Log}(\sigma) \times \text{Log}(t_r)$ que ficam separadas, também colapsem em uma mesma curva de referência, como mostrado na figura abaixo.

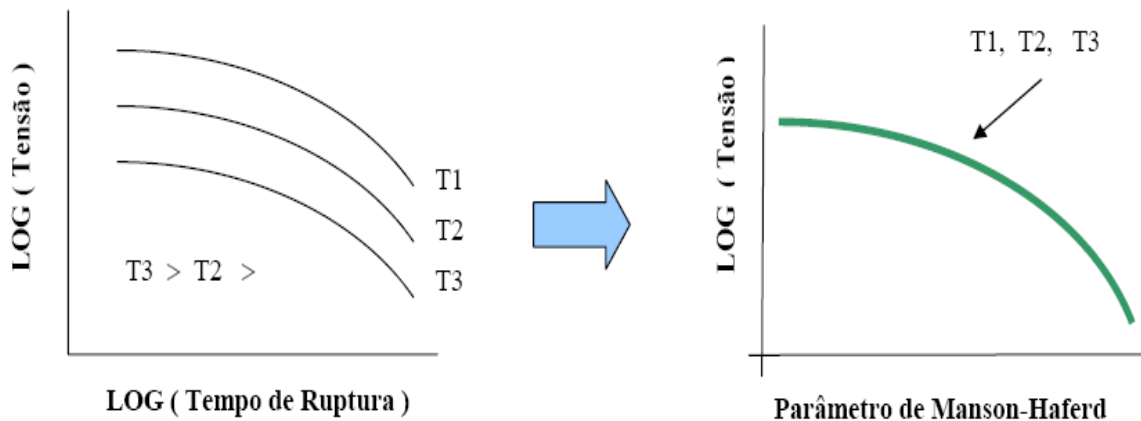


Figura 2.14 Conversão de uma família de dados $\text{Log}(\sigma) \times \text{Log}(t_r)$ em uma única curva de referência $\text{Log}(\sigma) \times P$, segundo o método de Manson-Haferd [33].

- b) Outros métodos de extrapolação: Os outros métodos fazem diferentes hipóteses para o padrão de disposição das linhas de iso-tensão no plano Log
- c) $(t_r) \times 1/T$ ou $\text{Log}(t_r) \times T$. Por exemplo, o Método de Orr-Sherby-Dorn [30] supõe que as linhas de iso-tensão no plano $\text{Log}(t_r) \times 1/T$ são paralelas entre si; o método de Goldhoff-Sherby [31] supõe que as linhas de iso-tensão no plano $\text{Log}(t_r) \times 1/T$ são convergentes num ponto $[1/Ta, \text{Log}(ta)]$ situado no 4º quadrante do gráfico, enquanto que o método de White-Le-May [32] considere a convergência das linhas de iso-tensão no plano $\text{Log}(t_r) \times 1/T$ ocorrendo no 1º. Quadrante, acima da região dos dados experimentais. O método de Manson-Succop [34], por outro lado assume que as linhas de iso-tensão no plano $\text{Log}(t_r) \times T$ são paralelas entre si.

Com os modernos recursos computacionais que tiveram acelerado desenvolvimento a partir da década de 1980, foram elaborados e refinados métodos mais modernos de parametrização e extrapolação de dados de fluência, tais como os métodos de Manson-Ensign e Mega [36,37], o método de Projeção-Teta de Evans e Wilshire [26] e o método Omega de Prager [38].

2.4 Equivalência entre Comportamentos de Tração a Quente e Fluência

A primeira tentativa de equivalência entre os fenômenos de tração a quente e fluência aparece na literatura com o trabalho de Steen. Esse autor descreve um método que pode ser utilizado para obtenção de taxas de fluência no estado secundário por extrapolação a partir de dados de tração em taxa de deformação constante. Com essa técnica o autor faz também uma tentativa de obtenção da vida residual de vários materiais utilizados em serviço em alta temperatura, apontando resultados satisfatórios, quando comparados com dados reais de ensaios de fluência. ele recomenda a utilização de dados de

tração a quente com taxa de deformação constante, em substituição aos ensaios acelerados de fluência [39].

Osgerby e Dyson [40] propuseram uma metodologia bem mais completa para comparar os dois tipos de dados. O trabalho desses autores é importante pelo fato de que o seu tratamento é amparado por um modelo físico baseado em equações envolvendo mecanismos do comportamento de fluência. Utilizando este modelo e um procedimento computacional adequado parece possível prever trajetórias da tensão em função da deformação sob taxa de deformação constante, mesmo além do ponto de carga máxima.

Segundo esses autores, os comportamentos de fluência nos estágios primário, secundário e terciário podem ser descritos pelas equações:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 (\sigma/\sigma_0)^n \cdot (1-H)^n \cdot (1+S) \cdot \exp(\omega) \dots\dots\dots 2.9 a$$

$$H = (h \dot{\epsilon}/\sigma) \cdot [1 - [(1/H^*-1)/(1/H-1)]^n - H(\sigma'/\sigma)] \dots\dots\dots 2.9 b$$

$$\dot{S} = C \cdot \dot{\epsilon} \dots\dots\dots 2.9 c$$

$$\dot{\omega} = k \cdot \dot{\epsilon} \dots\dots\dots 2.9 d$$

onde: $\dot{\epsilon}_0$ - taxa de fluência inicial do material sob ação de σ_0 ; H - função relativa ao aumento da tensão interna normalizada, que produz fluência primária, com valor de saturação H^* e coeficiente de endurecimento h; S - função que descreve fluência terciária devido a mecanismos de recuperação por discordâncias, associado a uma constante C; ω - função que descreve fluência terciária devido a cavitação intergranular, associado a uma constante k.

Contrariamente à recomendação de Steen [39], Osgerby e Dyson [40] enfatizam que o teste de fluência pode substituir economicamente os testes de tração a quente em muitas situações, pelo uso de equipamento bem menos oneroso e tempos de ensaio bem mais curtos.

Um programa computacional denominado CRISPEN foi desenvolvido no N.P.L. - National Physical Laboratory, Londres, para fazer a correlação entre ensaios de tração e fluência, baseado no modelo de Osgerby e Dyson [40] mediante a utilização das Equações 2.9 a, b, c, d.

A Figura 2.15a mostra a análise de uma curva de fluência segundo o modelo proposto e a Figura 2.15b prediz a curva correspondente de tração a quente sob taxa de deformação constante, apresentando os dados experimentais referentes ao comportamento de uma superliga à base de Níquel sobrepostos para comparação.

Depois desse trabalho, publicado em 1993, Osgerby e Dyson [40] aparentemente não voltaram a testar o modelo em outras condições com o mesmo material ou outros materiais.

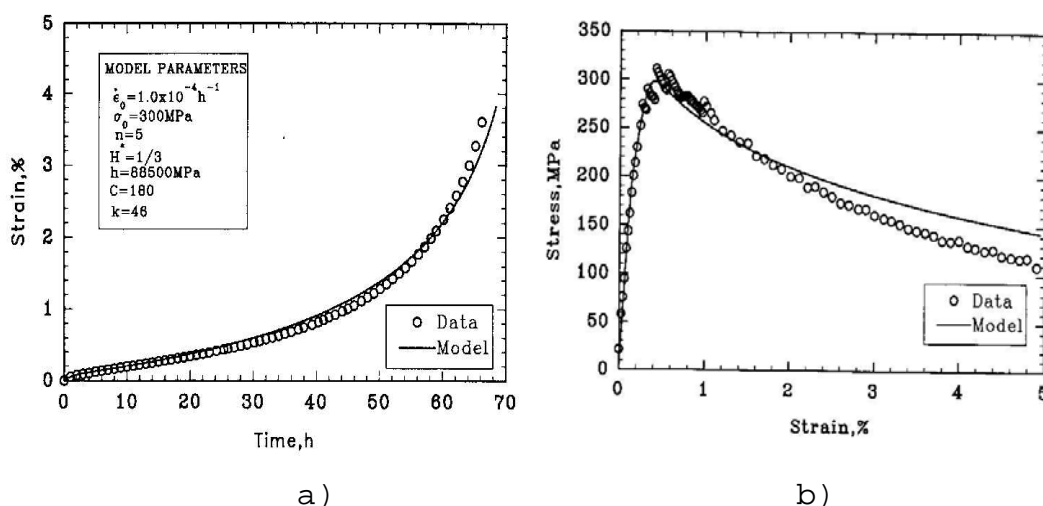


Figura 2.15 Previsão do comportamento de tração a quente a partir de dados de fluência, segundo o modelo de Osgerby & Dyson [40]. Material: superliga à base de Níquel.

Na busca pela equivalência entre os dados de fluência e tração a quente Bueno e Reis Sobrinho [41,42,43] elaboraram um critério que considera basicamente que o pico de tensão, o tempo necessário para que ele ocorra e a taxa de deformação, gerados em testes de tração a taxa de deformação constante em altas temperaturas, é equivalente respectivamente à tensão aplicada, ao tempo de ruptura e a taxa mínima de fluência obtidos nos ensaios de fluência. De maneira mais específica este critério estabelece que:

1. A taxa de deformação no ensaio de tração é equivalente à taxa mínima de fluência.

2. O limite de resistência do teste de tração equivale à tensão aplicada no teste de fluência.
3. O tempo de ocorrência do limite de resistência é equivalente ao tempo de ruptura nos testes de fluência.

A Figura 2.16 mostra o critério de equivalência descrito acima para as curvas de tração e fluência, onde a curva tensão x deformação para o teste de tração é representada com velocidade de tração V_T , ou taxa de deformação, constante e a curva de fluência, deformação x tempo, para o material é obtida com carga F , ou tensão (σ) constante.

Essas curvas permitem a obtenção dos parâmetros de equivalência entre os ensaios. Nos testes de tração a tensão máxima é obtida no ponto de instabilidade de carga, onde ocorre a formação do pescoço, que é equivalente, no ensaio de fluência, à condição de instabilidade que ocorre nas vizinhanças do tempo de ruptura da amostra [19].

Este critério foi extensivamente comprovado utilizando-se numerosos dados de tração a quente e fluência obtidos no aço 2,25Cr-1Mo no estado virgem [41,42].

A análise dos resultados mostra notável compatibilidade entre os dados nas duas modalidades de teste em gráficos segundo as relações propostas por Norton [27], Zenner-Hollomon [26], Arrhenius [26] e Monkman-Grant [28].

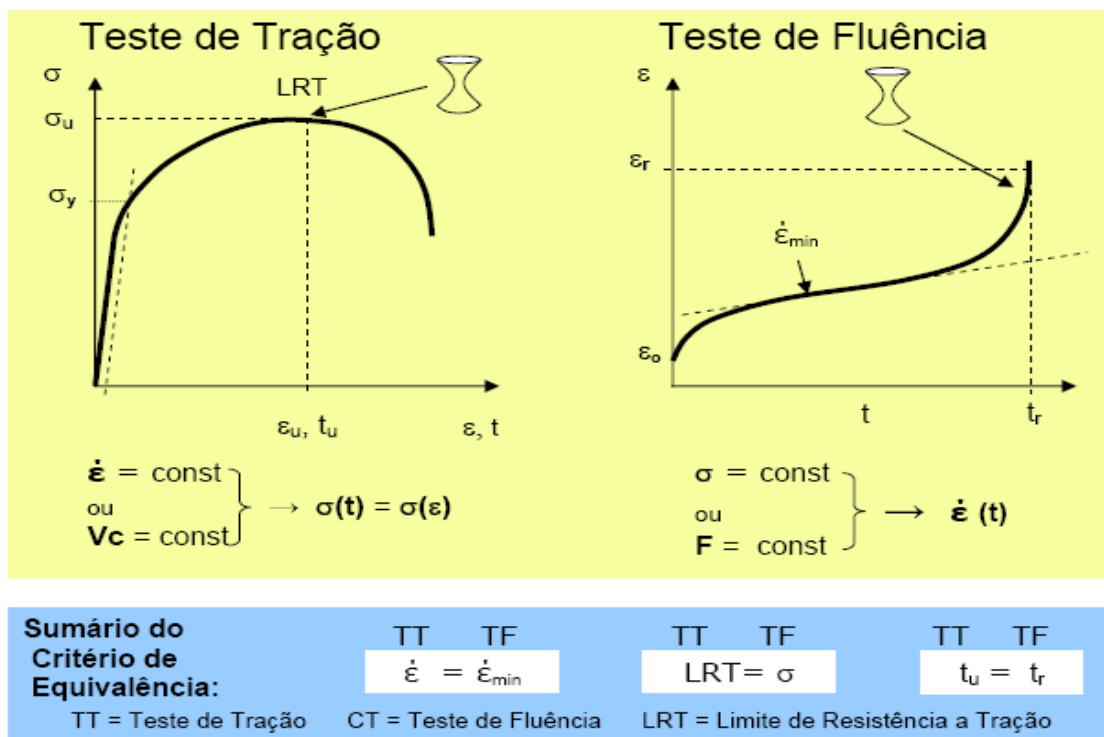


Figura 2.16 Analogia dos parâmetros envolvidos nos testes de tração e fluência com o sumário das regras de equivalência entre os fenômenos.

As Figuras 2.17 a, b, c e d mostram resultados dessa análise realizada com os dados do aço 2,25Cr-1Mo na faixa de temperatura de 500°C a 700°C [9]. As Figuras 2.17 a, c e d mostram inclusive os dados de tração do material à temperatura ambiente (25°C), que também apresentam compatibilidade com o restante dos resultados, sugerindo a possibilidade de existência do comportamento de fluência à temperatura ambiente.

Esta seria uma possibilidade de estudo inteiramente inédita, da qual houve tentativa de comprovação neste trabalho.

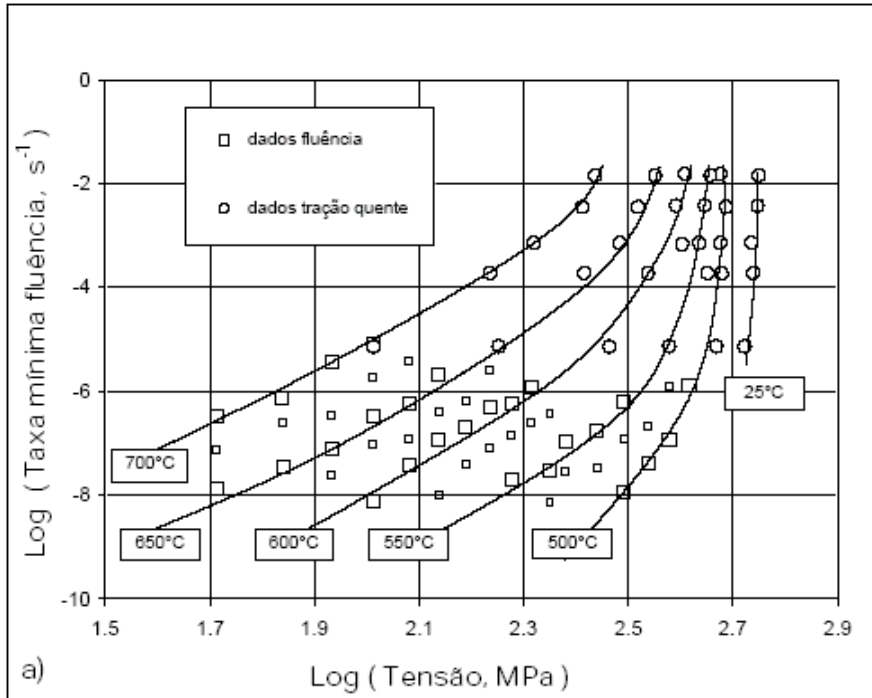


Figura 2.17 a) Log (Taxa mínima de fluência) versus Log (Tensão), segundo Reis Sobrinho [9]

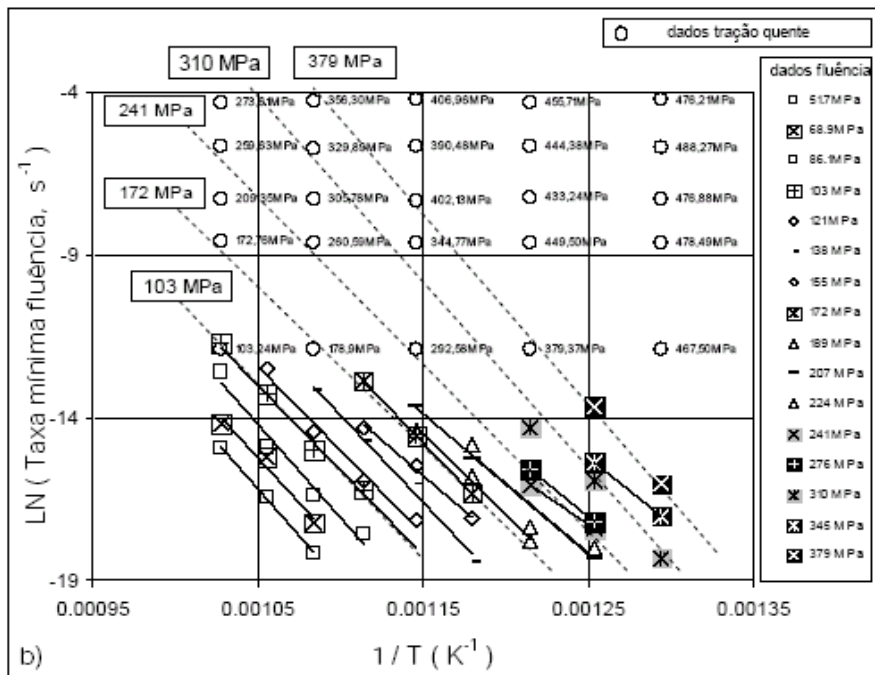


Figura 2.17 b) LN (Taxa mínima de fluência) versus 1/Temperatura segundo Reis Sobrinho [9].

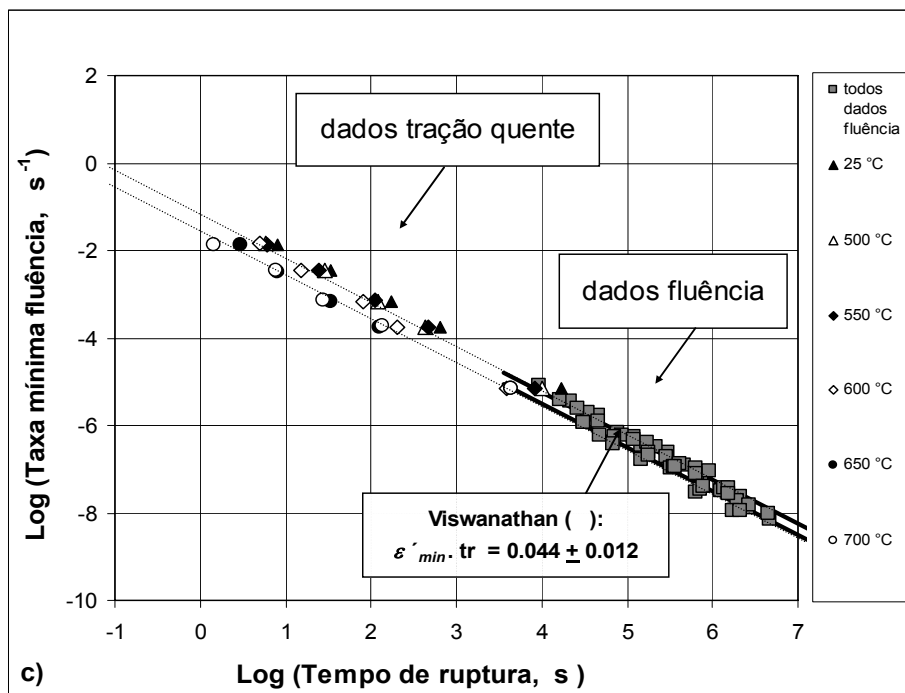


Figura 2.17 c) Log (Taxa mínima de fluência) versus Log (Tempo de ruptura) segundo Reis Sobrinho [9].

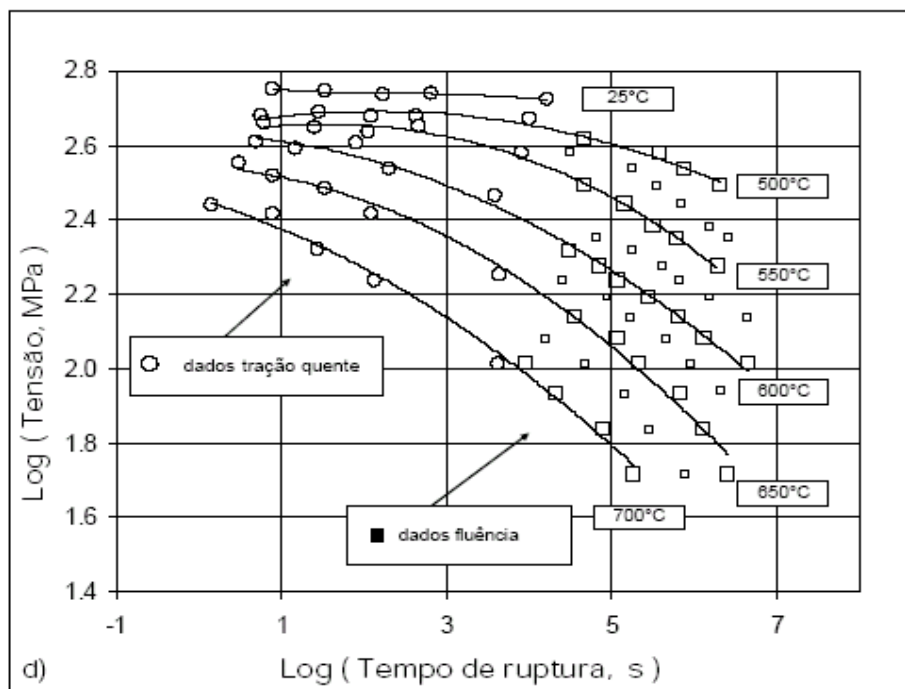


Figura 2.17 d) Log (Tensão) versus Log (Tempo de ruptura) segundo Reis Sobrinho [9].

O critério de conversão de resultados de tração a quente para fluência apresenta compatibilidade também quando os dados das duas modalidades de teste são submetidos às metodologias tradicionais de parametrização, como demonstraram Reis Sobrinho e Bueno [42,43] para o aço 2,25Cr-1Mo, empregando 5 técnicas diferentes de parametrização propostas na literatura. Esse estudo mostrou um melhor desempenho para o método de Manson-Haferd [33], tanto na análise dos dados de tempo de ruptura como dos dados de taxa mínima de fluência, Figuras 2.18a e 2.18b, apresentam os resultados dessa comparação para o método de Manson-Haferd.

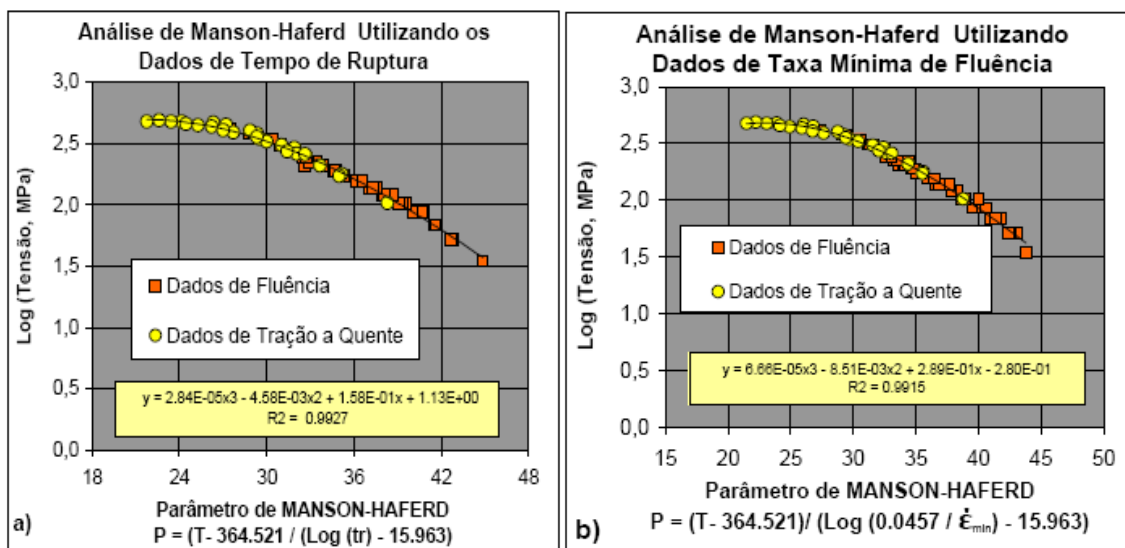


Figura 2.18 Curvas de parametrização segundo o método de Manson-Haferd [33]: a) usando dados de tempo de ruptura; b) usando dados de taxa mínima de fluência acoplados à relação de Monkman-Grant. Material: aço ferrítico 2,25Cr-1Mo [42,43].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 O Aço Ferrítico 2,25Cr-1Mo

O programa principal deste estudo foi realizado no aço 2,25Cr-1Mo, recebido na forma de uma chapa com espessura de 1 polegada (25,4 mm), conforme as especificações da ASTM A387 grau 22 Classe 2 [2], normalizado e revenido, sendo sua microestrutura constituída por 30 % de ferrita e 70% bainita e com grãos da ordem de 30 μm .

A figura 3.1 apresenta a microestrutura do aço 2,25Cr-1Mo usado neste trabalho.

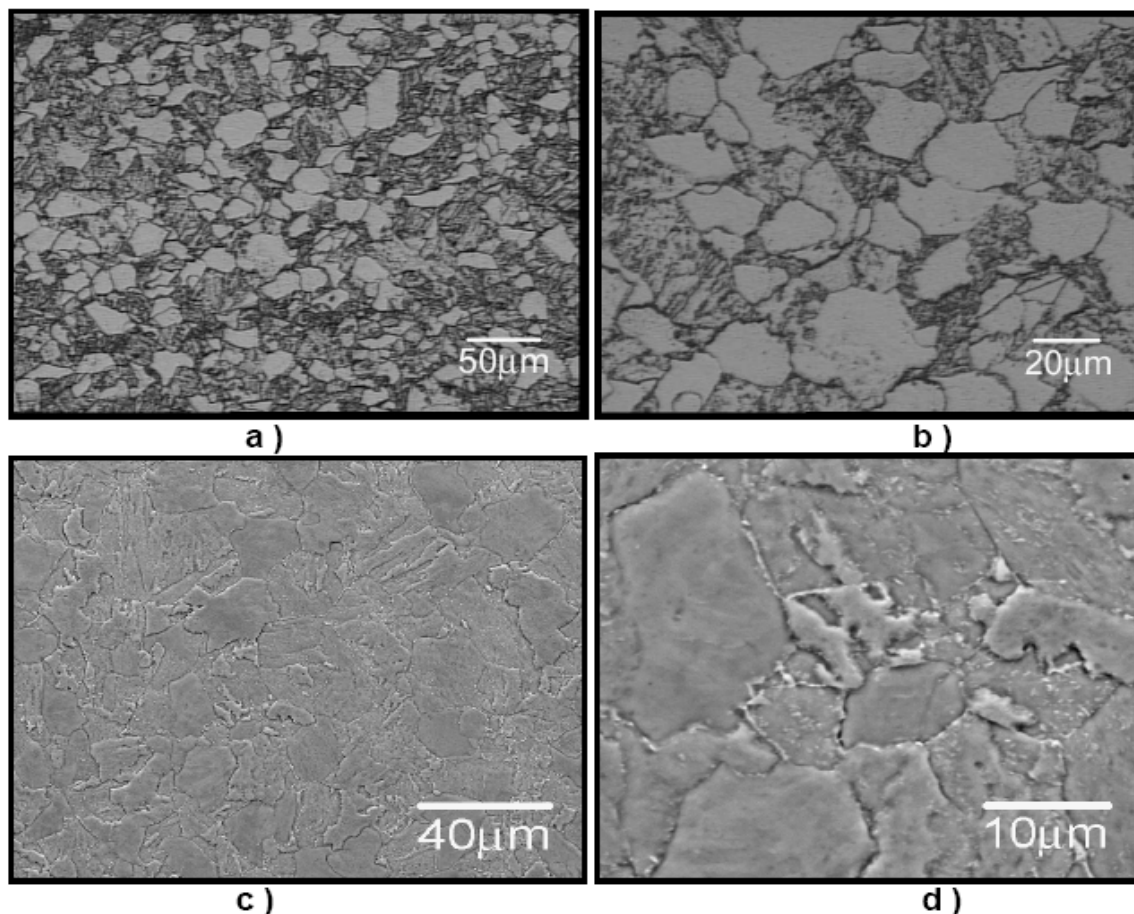


Figura 3.1 Microestruturas do aço 2,25Cr –1Mo como recebido. Ataque Nital2%
a) Microscopia ótica com aumento original no aparelho de 250x; b)
Idem, 500x; c) M.E.V., com aumento original no aparelho de 1000x;
d) Idem 1700x.

3.1.2 O Aço Inoxidável Austenítico AISI 310

Para investigar a possibilidade de validade da equivalência entre dados de tração a quente e fluência em outros materiais, foram utilizados alguns resultados obtidos anteriormente como aço inoxidável austenítico AISI 310 por Contin Jr. [47]. Vários corpos de prova deste trabalho ficaram disponíveis, para serem realizados ensaios posteriores de tração a quente ou fluência.

O material havia sido fornecido na forma de barra com diâmetro de ½”, laminada a quente. Realizou-se um tratamento de solubilização a 1050°C por 1 hora, com resfriamento rápido em água, ficando o material com uma estrutura totalmente austenítica com tamanho de grão médio da ordem de 210 µm. A análise química do material revelou a composição mostrada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Composição química do aço AISI 310

TABELA 3.1 – Composição química do aço AISI 310							
Elemento (% peso)	C	Ni	Cr	Mn	Si	S	P
Real	0,17	21,1	24,0	1,6	0,11	-	-
Padrão	0,25	19 - 22	24 - 26	2,0	1,5	< 0,03	< 0,05

3.2 Ensaios de Tração a Quente

3.2.1 No Aço Ferrítico 2,25Cr-1Mo

Os corpos de prova para os ensaios de tração foram usinados no sentido longitudinal da laminação, tendo forma cilíndrica com roscas nas extremidades, possuindo um diâmetro inicial $d_0=6,25$ mm e comprimento inicial $L_0=25$ mm para os ensaios sem extensômetro, que tiveram por finalidade a determinação de parâmetros como a taxa de deformação, limite de resistência, encruamento, alongamento final e redução de área. No caso dos ensaios de tração realizados com extensometria utilizaram-se corpos de prova com

$L_0=50\text{mm}$, buscando-se a obtenção do limite de escoamento e do módulo de elasticidade. A Figura 3.2 apresenta um esquema dos corpos de prova utilizados para o aço 2,25Cr-1Mo.

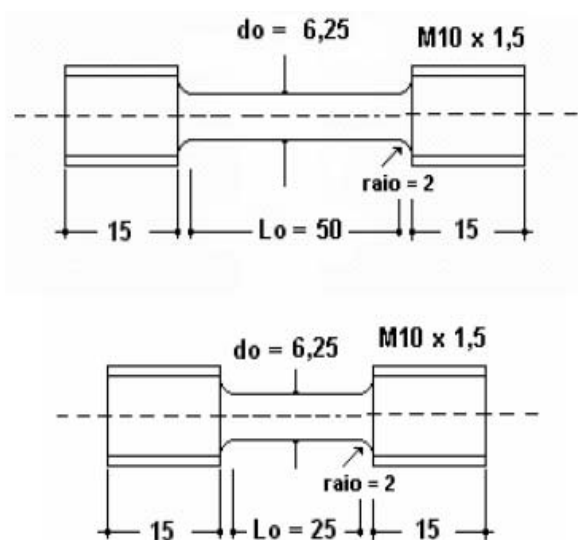


Figura 3.2 Esquema dos corpos de prova para os ensaios de tração: a) com extensômetria; b) sem extensômetria.

Os ensaios de tração a quente, referentes ao presente estudo foram realizados em uma faixa ampla de temperatura entre 25°C e 700°C e taxas de deformação de $1,33 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ a $1,67 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, buscando completar o estudo realizado por Reis Sobrinho e Bueno [15,16,17] e comprovar a credibilidade do critério de equivalência numa faixa experimental mais ampla.

Os ensaios de tração a quente foram realizados em uma máquina servo-hidráulica marca INSTRON modelo 8802, com um forno com 3 zonas de aquecimento associado a um sistema de controle de temperatura também de marca INSTRON, que garante a estabilidade em um nível da ordem de $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Quanto às velocidades de tração que foram utilizadas no estudo, 5 delas foram as mesmas utilizadas por Reis Sobrinho [17] ou seja: 0,01; 0,25; 1,0; 5; 20 mm/min buscando uma varredura mais completa do comportamento do material incluiu-se velocidade de tração mais alta: 200 mm/min e outra mais

baixa: 0,0025 mm/min. As temperaturas empregadas no ensaio de tração variaram entre 25 e 450°C (25 – 100 – 200 – 300 – 400 e 450°C). Para complementar os dados obtidos por Reis Sobrinho [17] na faixa de 500 a 700 °C (500 – 550 – 600 – 650 - 700°C).

Os ensaios de tração com extensometria foram realizados também na faixa de 25°C a 450°C para completar os dados obtidos por Reis Sobrinho [33] obtidos na faixa de 500°C a 700°C. Este tipo de ensaio foi feito empregando-se uma velocidade de tração inicial constante de 0,25mm/min até que se definir a região de escoamento, seguido por um aumento da velocidade de tração para 2,5 mm/min após a retirada do extensômetro, como recomenda a norma ASTM E - 21 [xxxx].

A Tabela 3.2 mostra as condições de ensaio que foram utilizadas no trabalho de Reis Sobrinho [17] juntamente com as novas condições de ensaio que foram exploradas com este trabalho.

Tabela 3.2 - Condições para os Ensaio de Tração

Velocidades de Deformação (mm/min)	TEMPERATURA (°C)										
	25	100	200	300	400	450	500	550	600	650	700
0,0025	N	N	N	N	N	N	—	—	—	—	—
0,01	N	N	N	N	N	N	R	R	R	R	R
0,25	N	N	N	N	N	N	R	R	R	R	R
1	N	N	N	N	N	N	R	R	R	R	R
5	N	N	N	N	N	N	R	R	R	R	R
20	N	N	N	N	N	N	R	R	R	R	R
200	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	Ensaio realizados por Reis Sobrinho (R) [16].										
	Ensaio realizados neste programa de mestrado (N)										

3.2.2 No Aço Inoxidável Austenítico AISI 310

Os dados de tração do aço AISI 310 foram obtidos somente a 700°C, utilizando-se as seguintes velocidades de tração: 0.001 – 0.01 – 0.05 – 0.2 – 0.5, 2 – 5 e 20 mm/min, com uma máquina marca INSTRON modelo 5500 R associada a um sistema de forno com 3 zonas de aquecimento e controlador de temperatura marca Contemp modelo CTM 45. Os corpos de prova foram usinados com as seguintes dimensões: comprimento inicial $L_0 = 50$ mm e diâmetro inicial $d_0 = 6$ mm, como mostra a Figura 3.3.

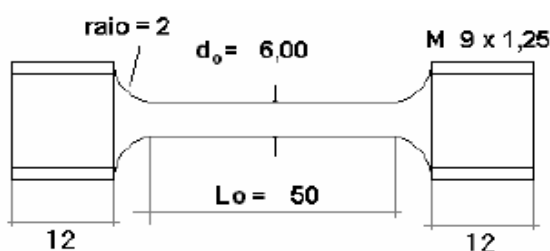


Figura 3.3 Esquema dos corpos de prova para os ensaios de tração a quente no aço inoxidável AISI 310.

3.3 Ensaios de Fluência

3.3.1 No Aço Ferrítico 2,25Cr-1Mo

Os ensaios de fluência foram realizados em um conjunto de 10 máquinas de fluência construídas conforme modelo-protótipo desenvolvido por Bueno [46] que possibilitam a realização tanto de ensaios a carga constante como a tensão constante. No caso do aço 2,25Cr-1Mo, todos os ensaios de fluência foram realizados na modalidade de *carga constante*, de acordo com a norma ASTM E-139 [35]. A Tabela 3.2. apresenta as condições selecionadas para os ensaios de fluência, identificando as condições utilizadas anteriormente nos testes de Reis Sobrinho [9] que cobriram durações entre 2 horas e aproximadamente 1300 horas, na faixa de temperatura de 500°C a 700°C e tensões na faixa de 52 a 414 MPa.

O presente estudo objetivou a realização de ensaios de fluência empregando maiores níveis de tensão (menores tempos de ruptura) na mesma faixa de temperatura, com o objetivo de gerar dados na região do comportamento de tração a quente.

Neste estudo também foram realizados ensaios na faixa de temperatura de 25°C a 450°C, envolvendo altos níveis de tensão, programados de acordo com os dados de Limites de Resistência do material em cada uma dessas temperaturas, em diferentes taxas de deformação, sob tração a quente. Um dos interesses mais significativos desses resultados está na verificação do comportamento de fluência em níveis bem baixos de temperatura, incluindo a possibilidade de ocorrência de fluência à temperatura ambiente, como indicaram os resultados da análise da equivalência deste aço, mostrados nas Figuras 2.12 a, b, c e d.

Tabela 3.3 Condições de Tensão e Temperatura dos Ensaios de Fluência e seus Tempos de Ruptura (h).

T (°C)	TENSÃO (MPa)																		
	34	52	69	86	103	121	138	155	172	189	207	224	241	276	310	345	379	414	448
500															578,21	216,81	103,3	12,94	0,77
525												731,82	424,99	200,13	96,97	49,47	8,49		
550									531,49			175,18	90,65	40,36	13,23	7,80	0,96	0,092	
575							1230,59	427,46	178,25	114,78	50,03	18,67							
600					1280,0	374,03	180,45	78,85	32,87	20,14	8,67	4,76	6,06	0,65	0,28				
625				580,92	249,22	128,73	47,93	24,03	7,18										
650		727,29	353,0	187,20	60,10	32,70	9,63	3,36	1,97	1,07	0,20								
675	712,85	209,04	82,09	40,26	12,91	4,48													
700	249,9	51,06	21,43	6,90	2,55	1,58	0,52	0,13											
Quadrados Marrons: Ensaios por Reis Sobrinho [17].																			
Quadrados Amarelos: Ensaios Realizados neste Projeto.																			

Além dos procedimentos utilizados para a realização dos ensaios de tração, foram necessários alguns cuidados para a realização dos ensaios de fluência visando assegurar a confiabilidade necessária para que se possa trabalhar posteriormente com uma possível equivalência entre os resultados obtidos pelos ensaios de tração a quente e de fluência.

Um dos primeiros procedimentos consistiu na comparação das medidas de força do dinamômetro marca VEB modelo KMB-ME, capacidade de 400 kgf, dotado de um relógio comparador Mitutoyo número 11298, com as leituras da máquina INSTRON modelo 8802 operando com uma célula de carga INSTRON modelo A 21747-A, número de série: 382, com capacidade de 25000 kgf. Utilizando-se o mesmo dinamômetro foi feita uma comparação semelhante com as leituras de força em cada uma das 10 máquinas de fluência.

Outro procedimento realizado consistiu na calibração dos LVDTs que são acoplados aos extensômetros de fluência, utilizando-se um micrômetro Mitutoyo modelo 146.

3.3.1 No Aço Inoxidável Austenítico AISI 310

Os testes de fluência realizados no aço AISI 310 foram conduzidos à *tensão constante* como descrito por Contin Jr [47], utilizando o mesmo tipo de equipamento de fluência mencionado anteriormente. Todos os resultados de fluência descritos no presente trabalho foram aproveitados desse autor.

O alongamento dos corpos de prova de fluência foi obtido mediante a utilização de extensometria de alta temperatura, colhendo-se o deslocamento das hastes dos extensômetros fora dos fornos com transdutores LVDT marca Transtek modelo DC / DC 0243-000. A leitura e coleta dos dados foram realizadas na época com registradores de papel tipo x-t marca ECB modelo RB-102.

Os testes de fluência no aço AISI 310 foram conduzidos todos a 700°C em 11 diferentes níveis de tensão, a saber: 70, 90, 130, 140, 165, 180, 210, 250, 300, 344 e 375 MPa.

Os corpos de prova para os ensaios de fluência foram usinados com o mesmo formato e dimensões dos corpos de tração a quente, conforme mostrado na Figura 3.3.

A Figura 3.4. apresenta fotos dos dois principais equipamentos utilizados no trabalho: a máquina de ensaios de tração INSTRON, modelo 8802 e o conjunto de 10 máquinas de ensaio de fluência a carga constante.



Figura 3.4 a) Máquina de ensaios de tração servo-hidráulica INSTRON, modelo 8802; b) Conjunto de máquinas de ensaios de fluência usadas no presente trabalho.

3.4 Análise dos dados de tração a quente e fluência de outros autores

Em 1976 e 1977, Klueh e Oakes [48,49] e Klueh [50] publicaram um extenso conjunto de dados de tração (com velocidade constante de travessa) no aço 2,25Cr-1Mo submetido a vários tipos de tratamentos térmicos, a saber:

- i) Recozimento (AN-1), correspondente ao aquecimento durante 1 h a 927°C
- ii) seguido de resfriamento no forno até 300°C em ~ 30 h (resfriamento lento) [11,12]

- iii) Recozimento (AN-2), correspondente ao aquecimento durante 1 h a 927°C seguido de resfriamento no forno até 300°C em ~ 20 h (resfriamento moderado) [12].
- iv) Recozimento Isotérmico (I A), correspondente ao aquecimento durante 1 h a 927°C, resfriamento de 927°C até 704°C com 83°C / h, mantendo-se o material em 704°C por 2 h e resfriamento no forno [12].
- v) Condição Normalizada + Revenido (N+R): aquecimento por 1 h a 927°C + resfriamento ao ar + revenimento por 1h a 704°C + resfriamento ao ar [12].

Quatro níveis de taxas nominais de deformação foram usados nos ensaios de tração: $6,67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $6,67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $6,67 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ e $2,67 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ e cerca de 10 níveis diferentes de temperaturas de ensaio foram empregados entre 25°C e 593°C, para cada condição do material. Para as versões AN-1 e N+T do material, ensaios de tração em altas taxas de deformação ($0,16 \text{ s}^{-1}$, $1,6 \text{ s}^{-1}$, 16 s^{-1} e 144 s^{-1}) foram também empregados, mas esses resultados não serão considerados para análise na presente dissertação de mestrado, envolvendo o estudo da equivalência entre dados de tração e fluência.

Mais tarde, em 1978 e 1980, uma grande quantidade de ensaios de fluência a carga constante foi também relatada por Klueh [51,52] para as mesmas versões do aço. Os dados foram gerados basicamente a 454 °C, 510 °C e 566°C, com tempos de ruptura variando de algumas horas até cerca de 10000 h.

Felizmente, Klueh e Oakes [48,49], e Klueh [50] apresentaram tabelas bem completas com valores de todos os parâmetros envolvidos em seus resultados de tração, incluindo o valor da deformação no momento da tensão de pico (LRT), que permitiu a determinação do tempo de ocorrência da tensão de pico (t_u na Figura 2.16). Desta maneira, foi possível realizar a transformação de todos os dados de tração desses autores para dados equivalentes de fluência, usando as 3 regras do critério de equivalência mencionadas na

Sessão 2.4. desta dissertação.

Informações detalhadas foram apresentadas também para os dados de fluência, com relação a cada curva dos ensaios, tais como medida do tempo e deformação no início do estágio secundário e início do estágio terciário. Nos dois artigos que descrevem o comportamento de fluência do aço 2,25Cr-1Mo os valores de tempo de ruptura e taxa de fluência aparecem com unidades de h e h^{-1} respectivamente. No presente trabalho, estes valores foram convertidos para s e s^{-1} , respectivamente.

Tanto os resultados de tração como os de fluência reportados por esses autores podem ser considerados como dados de boa qualidade, uma vez que foram produzidos no Oak Ridge National Laboratories, USA, seguindo padrões apropriados em cada caso.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados de Tração a Quente no Aço 2,25Cr-1Mo na faixa de 25°C a 700°C

4.1.1 Avaliação da Resistência e Ductilidade nos Ensaios de Tração a Quente em diferentes Temperaturas e Taxas de Deformação

Através da realização dos ensaios de tração a quente sem extensometria, mediante a utilização dos corpos de prova com dimensões, $L_0 = 25$ mm e $d_0 = 6,25$ mm a várias velocidades de tração e temperaturas, foram obtidos dados de tensão e deformação nominais referentes a cada um dos ensaios realizados.

Esses resultados propiciaram a base para o desenvolvimento do estudo de fenômeno de tração a quente, além de possibilitar a confirmação da equivalência proposta com o fenômeno de fluência [40,9].

Porém para tal fez-se necessária à realização de correções referentes aos dados de tensão e deformação nominais obtidos inicialmente, em decorrência da acomodação da máquina. Este procedimento é realizado através da plotagem dos dados e subsequente conversões, para que se possa eliminar qualquer influência do equipamento nos resultados obtidos.

Por meio dos gráficos de Tensão/Deformação nominais, é possível o cálculo de uma série de parâmetros fundamentais para a compreensão dos fenômenos que ocorrem em tração a quente, para algumas condições específicas.

Esta discussão terá início com a introdução das Figuras 4.1a, 4.1b, 4.1c, 4.1d, 4.1e, 4.1f e 4.1g que apresentam um conjunto de gráficos Tensão/Deformação nominal para as velocidades de tração de 0,0025, 0,01, 0,25, 1, 5, 20 e 200 mm/min da temperatura ambiente até 700°C, ressaltando que na temperatura ambiente e na faixa de 500°C a 700°C os dados foram obtidos por Reis Sobrinho exceto na velocidade de tração de 200mm/min, onde todos os ensaios foram realizados no presente trabalho.

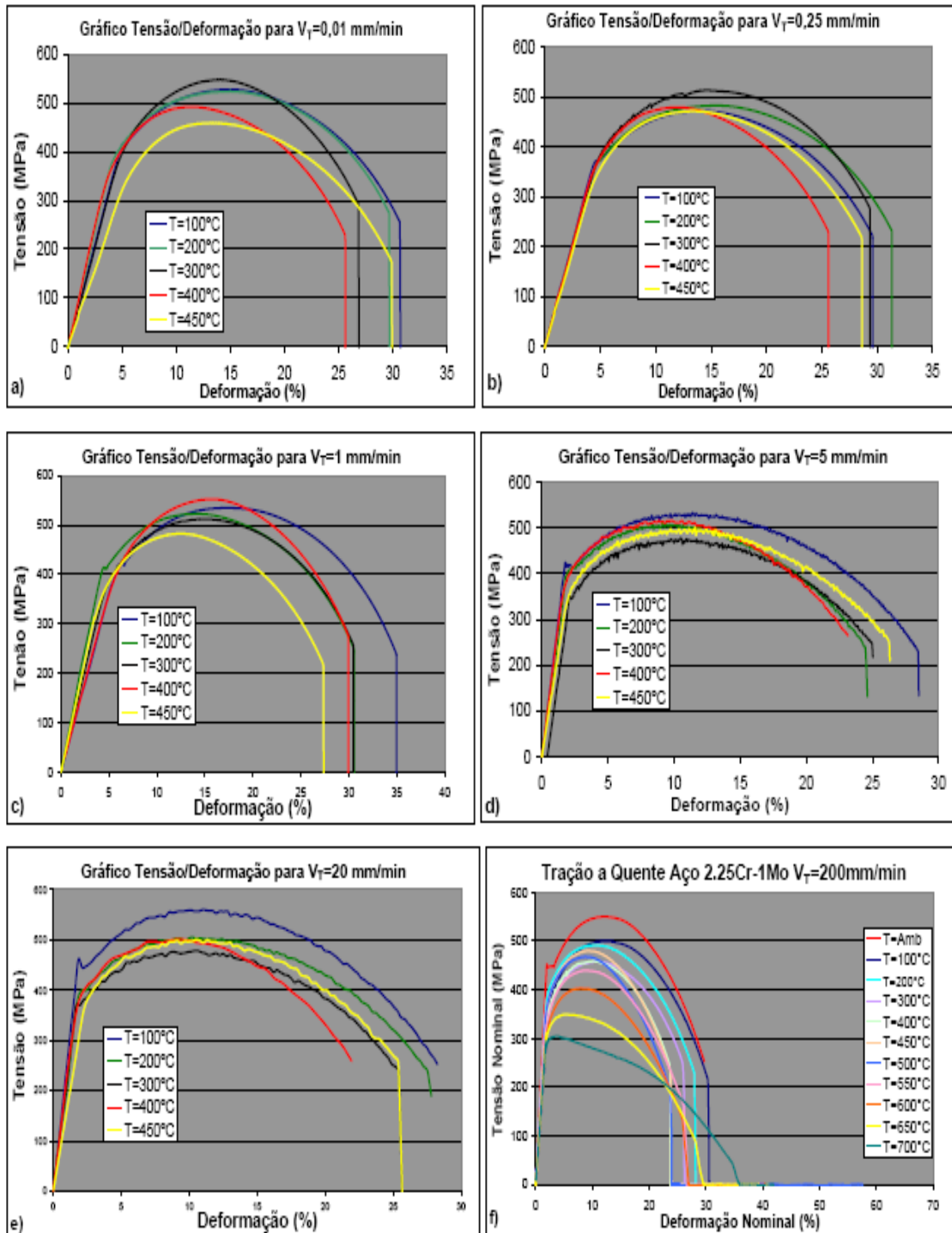


Figura 4.1 Gráficos Tensão/Deformação em função da Temperatura: a) $V_T = 0,01$ mm/min, b) $V_T = 0,25$ mm/min; c) $V_T = 1$ mm/min; d) $V_T = 5$ mm/min; e) $V_T = 20$ mm/min e f) $V_T = 200$ mm/min.

Com relação à Figura 4.1 pode-se observar através dos gráficos em função da velocidade de tração, que ocorrem inversões nas curvas para as temperaturas entre 100°C e 450°C, estas inversões ocorrem em maior ou menor intensidade, dependendo da temperatura.

Outro ponto importante se baseia na influência das diferentes taxas de deformação, que acabam por ocasionar diferenças no comportamento das curvas. Estas alterações são conseqüências do fenômeno de encruamento e da sensibilidade da taxa de deformação que são afetados pela temperatura e taxa de deformação.

Algumas curvas também apresentaram o efeito Portevin-Le-Chatelier [13] que pode ser notado através do serrilhado, sendo um indicativo da existência do fenômeno do endurecimento dinâmico por deformação (EDD) que sofre influência da faixa de temperatura de trabalho e da velocidade de tração.

As próximas informações são referentes ao comportamento da tensão de escoamento, do limite de resistência, alongamento final e redução de área do aço 2,25Cr-1Mo quando submetido a testes de tração a quente, para diferentes velocidades de tração e temperaturas, que serão introduzidas mediante uma série de figuras.

A análise se inicia pelas Figuras 4.2 a e 4.2 b que apresentam de forma comparativa, os dados dos comportamentos dos materiais com relação à tensão de escoamento e ao limite de resistência, respectivamente numa faixa de temperatura que abrange desde a temperatura ambiente até a 700°C.

A Figura 4.3a e 4.3b introduz os dados obtidos com relação ao alongamento final e a redução de área, na faixa de temperatura que vai desde a temperatura ambiente até 700°C e para diferentes velocidades de tração.

Nestas figuras vemos que o alongamento varia muito com a temperatura e a velocidade de tração, porém a redução de área se mantém para temperaturas inferiores a 300°C.

Mediante a análise das figuras 4.2 e 4.3 pode-se notar que com a diminuição da temperatura temos um aumento do limite de escoamento e de resistência do material, além de reduções no alongamento e na redução de área, estes fatos ocorrem em razão da maior dificuldade de movimento das discordâncias a baixas temperaturas, sendo necessárias tensões mais elevadas para promover a deformação do material, o que reflete numa menor ductilidade.

As dispersões encontradas nas figuras são decorrentes das variações das velocidades de tração, que em condições específicas juntamente com a temperatura podem sofrer influência do endurecimento dinâmico por deformação e do Efeito Portevin-Le-Chatelier [13].

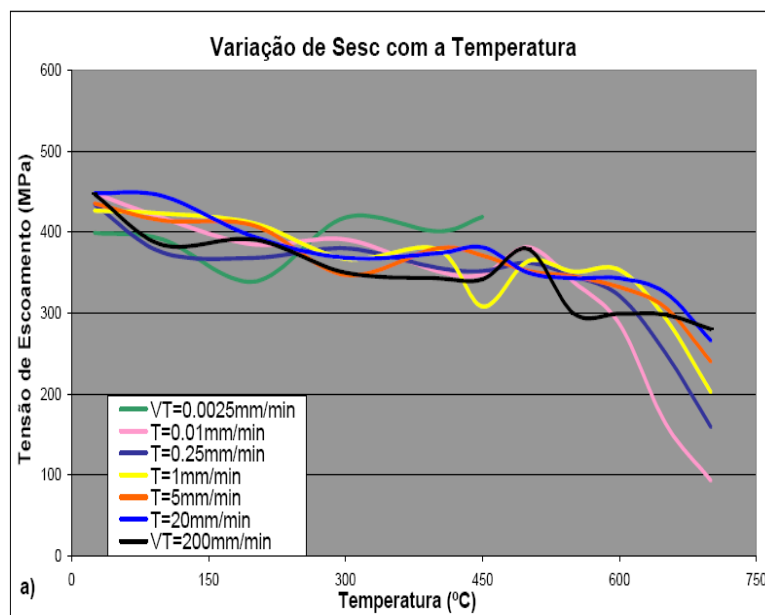


Figura 4.2 a) Dados comparativos da tensão de escoamento na faixa da temperatura ambiente a 700°C

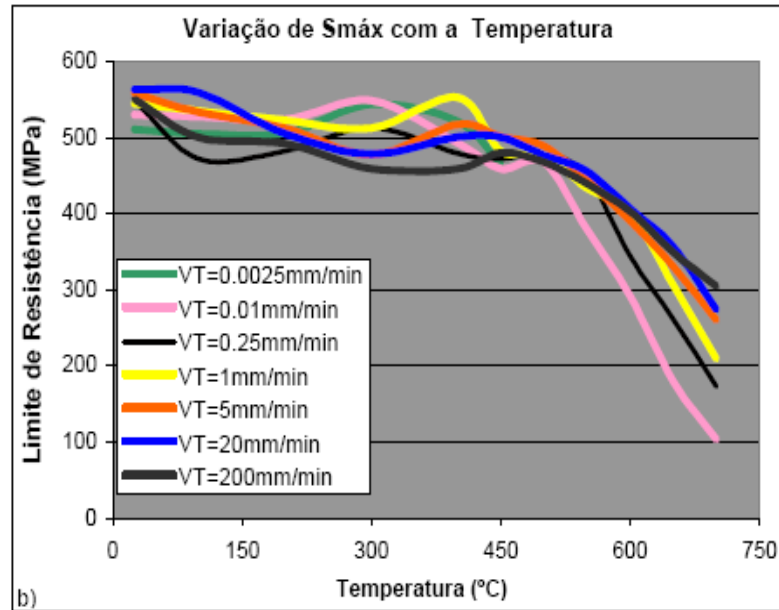


Figura 4.2 b) Dados comparativos do limite de resistência, faixa temperatura ambiente a 700°C. (obs: os dados referentes às temperaturas entre 500°C e 700°C obtidos por Reis Sobrinho).

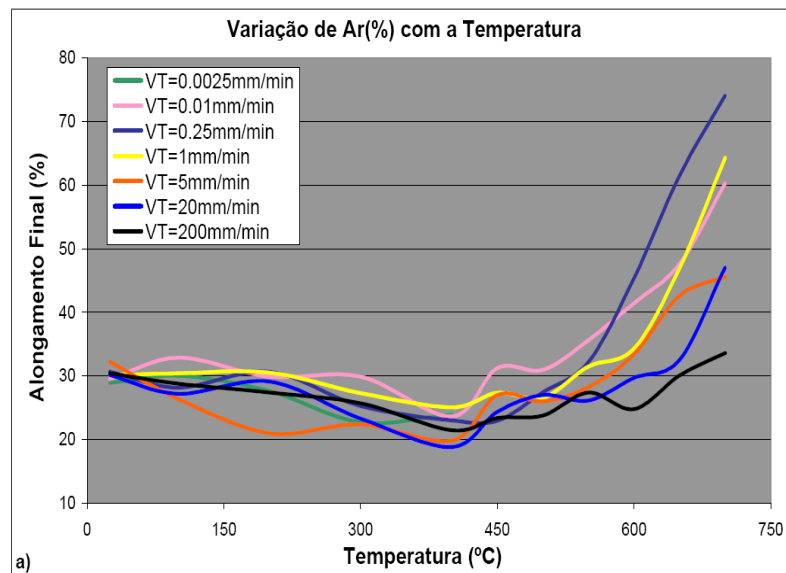


Figura 4.3 a) variação do Alongamento Final com a temperatura na faixa que vai da temperatura ambiente a 700°C.

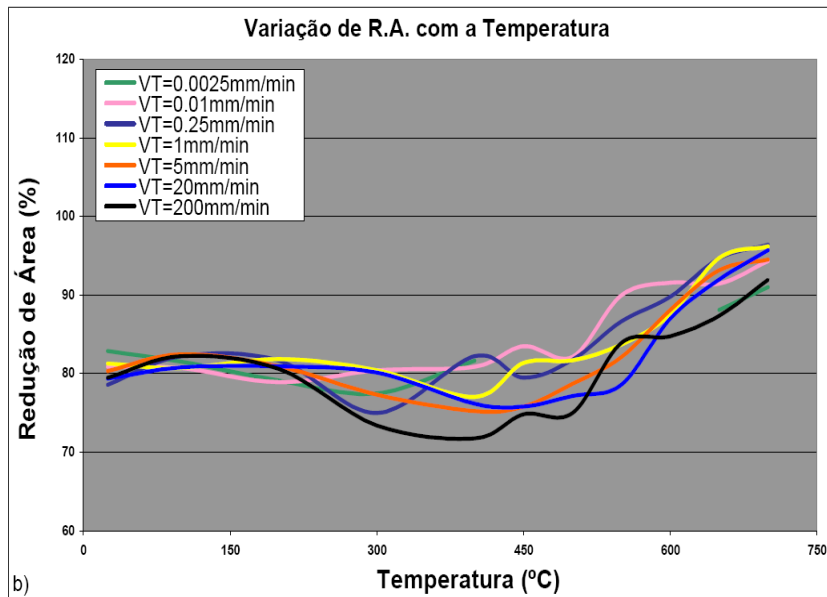


Figura 4.3 b) variação da Redução de Área, com a temperatura na faixa que vai da temperatura ambiente a 700°C

A Figura 4.4a e 4.4b apresenta um comparativo entre a tensão de escoamento e o limite de resistência com o logaritmo da deformação, para os ensaios de tração com a temperatura variando desde a temperatura ambiente até 700°C. Com relação às taxas de deformação, as mesmas se referem aos valores nominais estipulados por VT/L_0 .

A figura 4.5a e 4.5b mostra a variação do Alongamento Final e da Redução de Área com o logaritmo da taxa de deformação para as diferentes temperaturas ensaiadas.

A análise das figuras 4.4 e 4.5 vêm confirmar o que foi dito anteriormente com a apresentação das figuras 4.2 e 4.3 com relação ao comportamento do aço 2.25Cr-1Mo com a variação da temperatura e da taxa de deformação e também com relação aos fenômenos existentes no ensaio de tração para o aço.

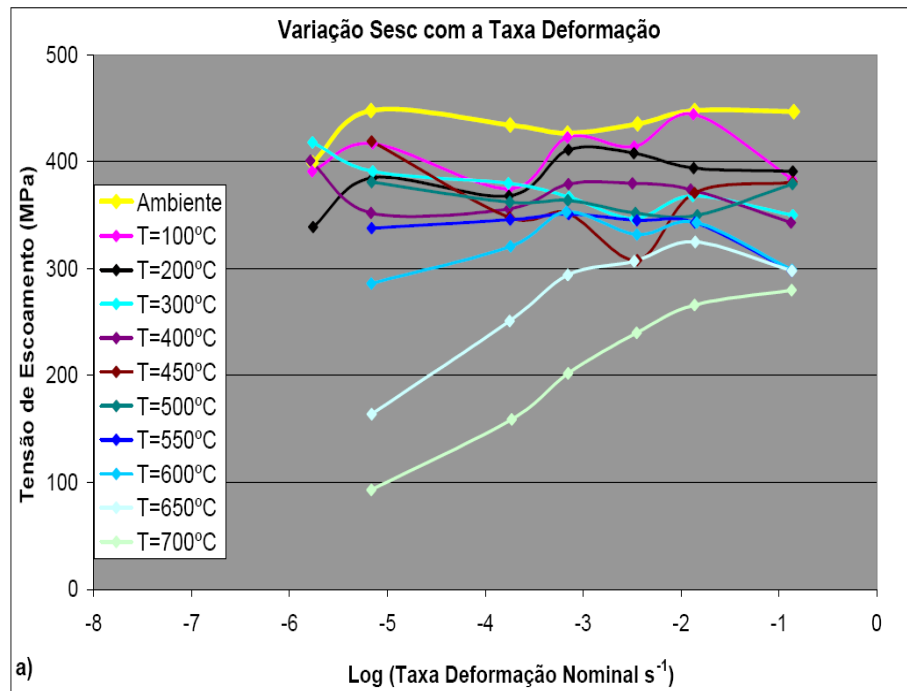


Figura 4.4 a) variação da Tensão de Escoamento com Taxa de Deformação Nominal, para a faixa de temperatura utilizada nos ensaios

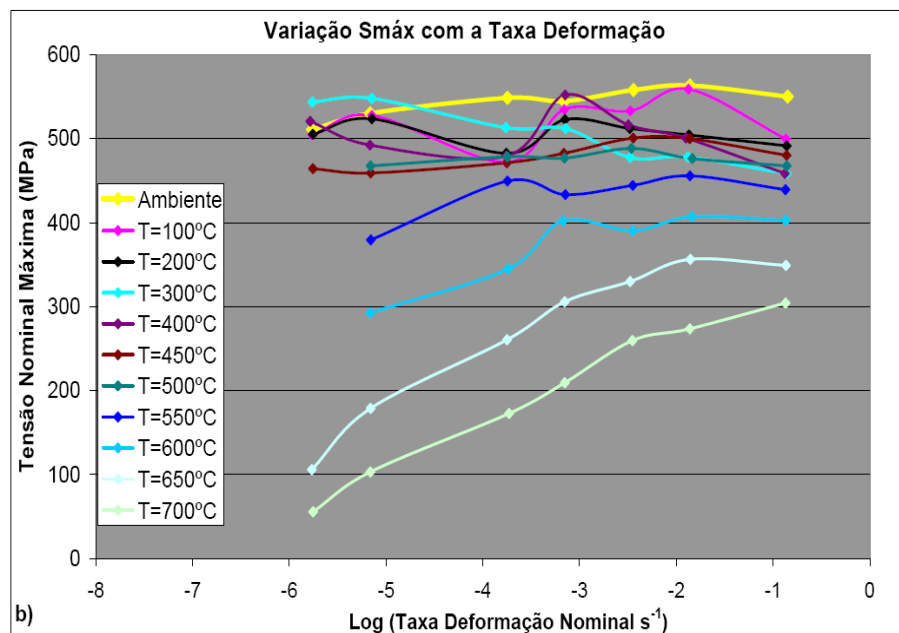


Figura 4.4 b) variação do Limite de Resistência com a Taxa de Deformação Nominal, para a faixa de temperatura utilizada nos ensaios.

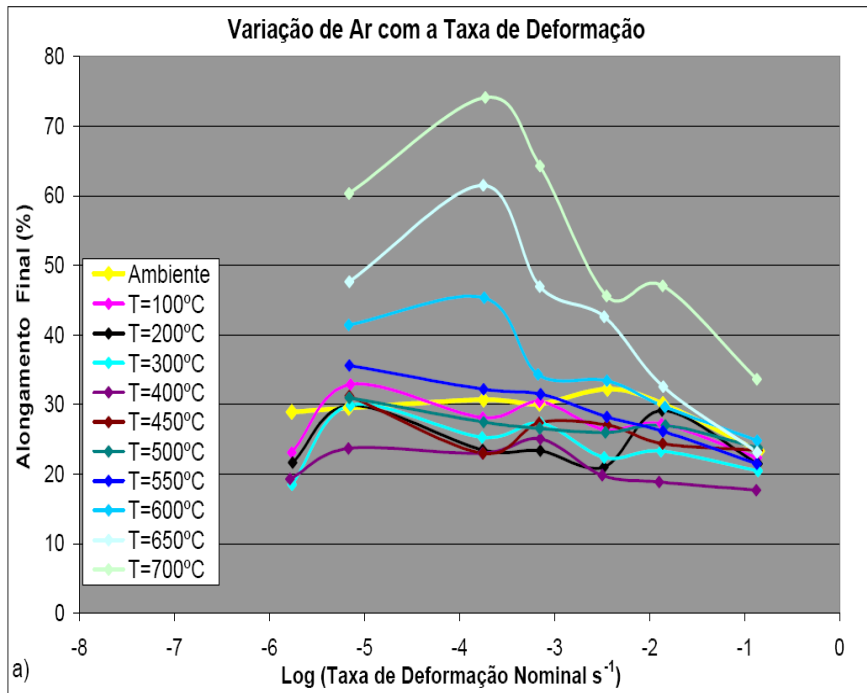


Figura 4.5 a) variação do Alongamento Final, com a Taxa de Deformação Nominal, para as temperaturas ensaiadas.

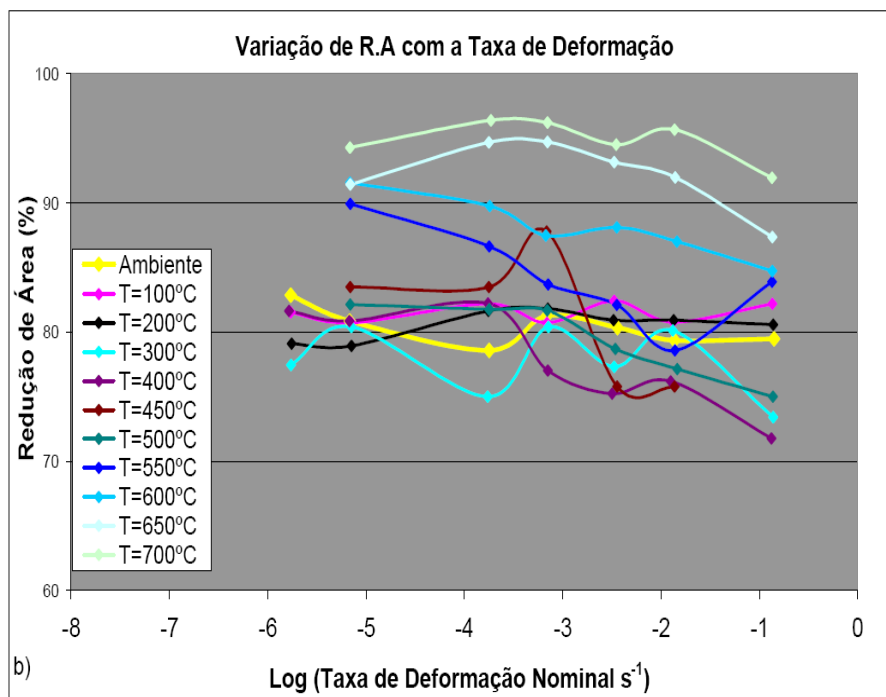


Figura 4.5 b) variação da Redução de Área, com a Taxa de Deformação Nominal, para as temperaturas ensaiadas.

4.1.2 Determinação do Limite de Escoamento e do Módulo de Elasticidade mediante a utilização de Ensaio de Tração com Extensometria

Com a realização destes ensaios procurou-se obter uma série de parâmetros que terão importância fundamental na compreensão dos mecanismos que regem o comportamento do aço em estudo. Neste caso foram utilizados corpos de prova com $L_0 = 50$ mm e $d_0 = 6,25$ mm.

A Figura 4.6a apresenta o comportamento do aço 2,25Cr-1Mo submetido ao ensaio de tração a quente com extensometria para a temperatura variando da ambiente até 700°C, onde se nota uma queda da curva com o aumento da temperatura. A Figura 4.6b mostra a região de variação da velocidade do travessão com a retirada do extensômetro.

A Figura 4.7 mostra o comportamento do Limite de Escoamento e do Limite de Resistência para o aço submetido aos ensaios de tração com extensometria, onde se nota que tanto o Limite de Escoamento como o Limite de Resistência decrescem com o aumento da temperatura, ocorrendo um pico de tensão em torno de 500°C. Esse fato é decorrente da influência do Endurecimento Dinâmico por Deformação nestas temperaturas.

A Figura 4.8 apresenta o comportamento do Alongamento Final e da Redução de Área com a temperatura, podendo-se comprovar que ambos sofrem um aumento com a temperatura.

A Figura 4.9 apresenta a avaliação do Módulo de Elasticidade com a Temperatura para o aço 2,25Cr-1Mo, ressaltando que o mesmo sofre um decréscimo com o aumento da temperatura. Esse fato ocorre pela maior facilidade de movimentação das discordâncias em altas temperaturas, resultando em uma maior ductilidade e em um Módulo de Elasticidade menor.

Existe um maior afastamento dos valores do Módulo Elástico obtidos para as temperaturas de 300, 400°C ocorre em virtude dos efeitos de endurecimento dinâmico por deformação e do Efeito Portevin-Le-Chatelier [11] mais acentuados nesta temperatura.

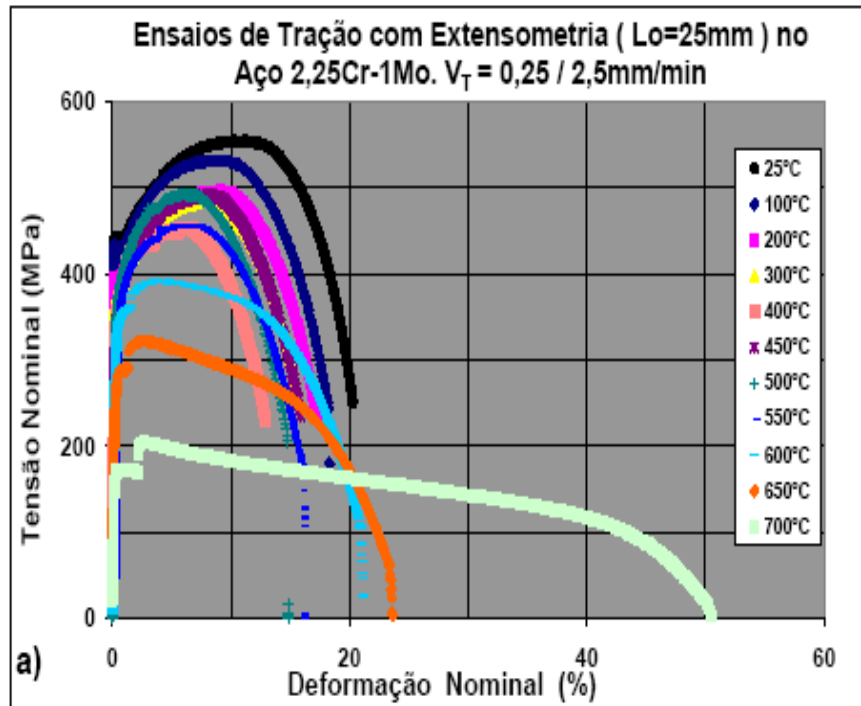


Figura 4.6 a) Tensão / Deformação para ensaios de tração a quente com extensometria e temperaturas variando na faixa da temperatura ambiente a 700°C

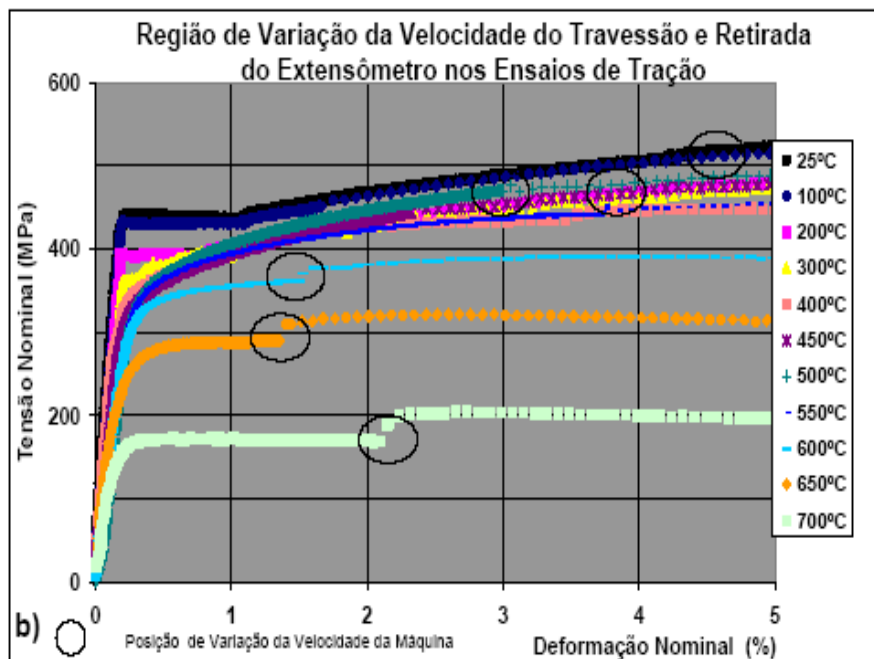


Figura 4.6 b) Variação da velocidade de tração após retirada do extensômetro.

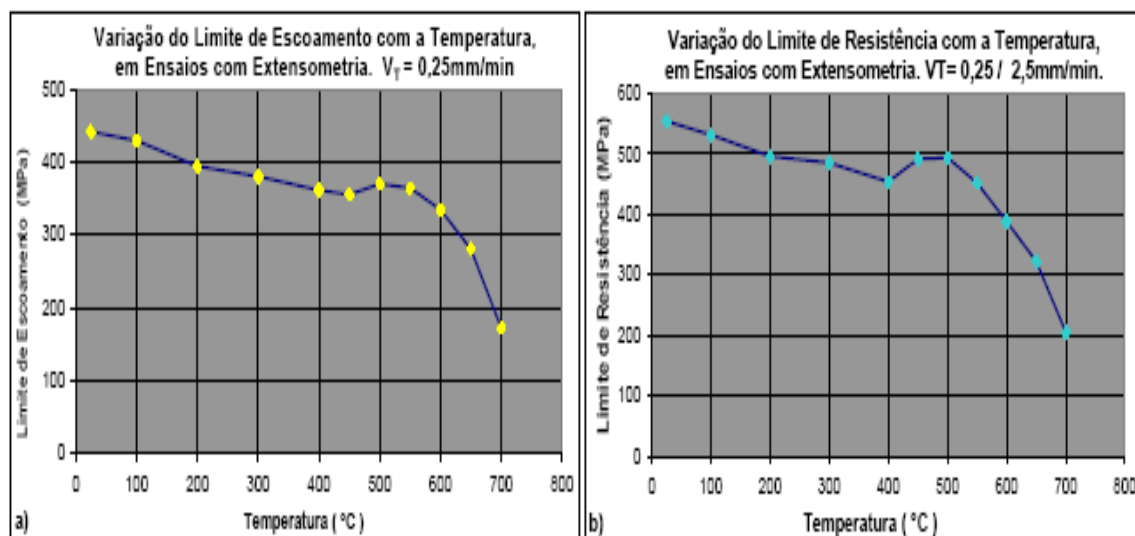


Figura 4.7 a) Limite de Escoamento; b) Limite de Resistência com Temperatura.

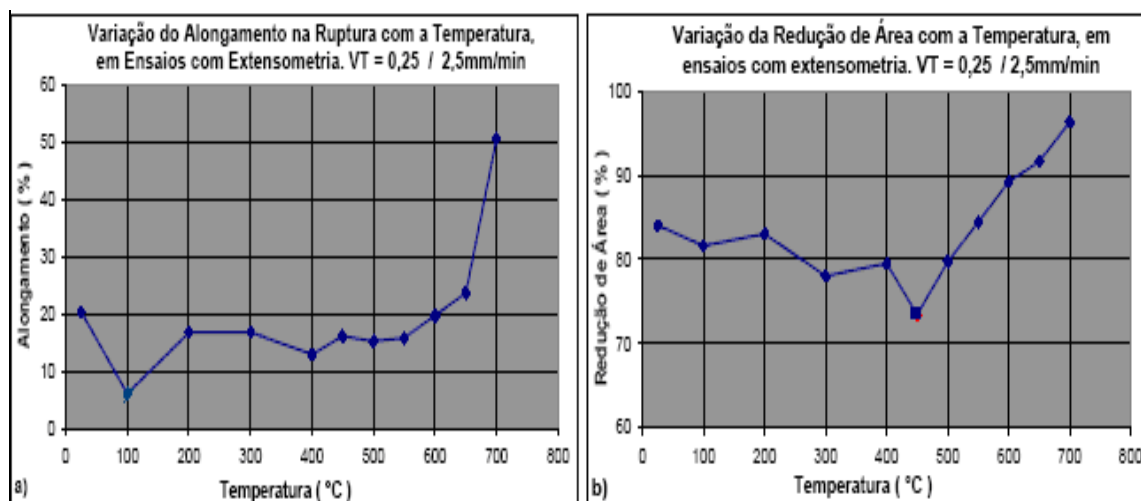


Figura 4.8 a) Variação do Alongamento Final; b) Redução de Área com a Temperatura.

Com a apresentação dessas figuras podemos comprovar que o Módulo de Elasticidade sofre um decréscimo com o aumento da temperatura e também podemos visualizar em algumas temperaturas o efeito do envelhecimento dinâmico por deformação, que se apresenta de forma mais acentuada nas temperaturas 300 e 400°C e também por serrilhado nas curvas.

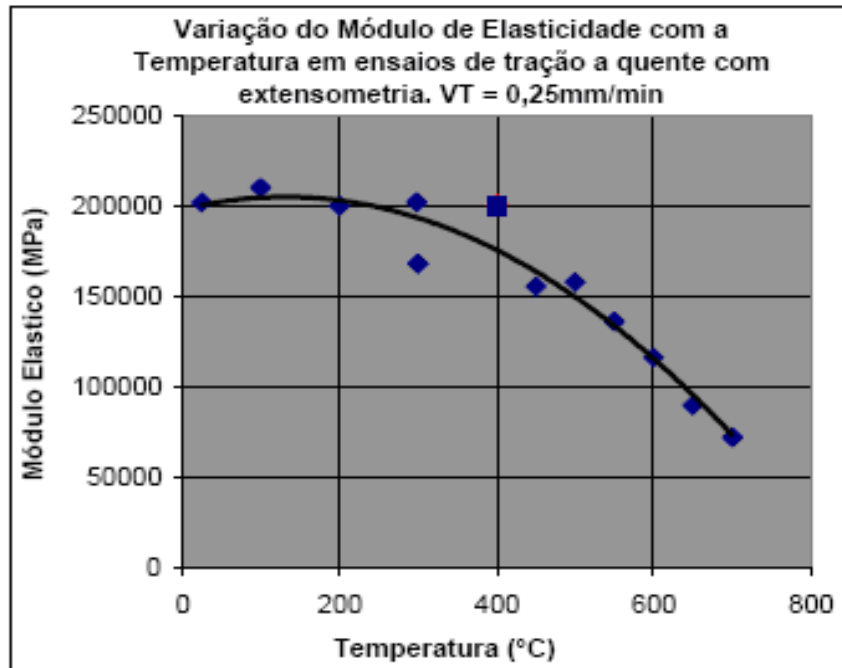


Figura 4.9 Variação do Módulo de Elasticidade com a Temperatura.

4.1.3 Avaliação dos Parâmetros referentes ao Encruamento e a Sensibilidade à Taxa de Deformação.

A Figura 4.10 apresenta um conjunto de gráficos que apresentam a variação de n' (Expoente de Encruamento) com a taxa de deformação para as temperaturas ensaiadas, mostrando ainda a existência de uma linearidade quando se plota n' versus $\text{Log}(\text{Taxa de deformação, s}^{-1})$.

A análise destes dados mostra que para a temperatura ambiente e para 100°C o expoente de encruamento médio teria o comportamento esperado (apesar de já ocorrerem algumas variações neste comportamento), ou seja, n' aumenta com o aumento da taxa de deformação.

Para as temperaturas de 200°C, 300°C e 400°C ocorre uma inversão desta condição (a inclinação das retas ajustadas se torna negativa), ou seja, o expoente de encruamento aumenta com o decréscimo da taxa de deformação.

Este fato ocorre em virtude do travamento das discordâncias por átomos de soluto, sendo necessária à liberação destas discordâncias para que

continue ocorrendo à deformação. Quando isso ocorre tem-se uma redução da tensão, o que facilita a movimentação das discordâncias, podendo se repetir sucessivamente o processo de ancoramento destas discordâncias, ocasionando os fenômenos de EDD e o Efeito Portevin-Le-Chatelier [13].

Para as temperaturas de 450°C, 500°C, 550°C, 600°C, 650°C e 700°C, os valores médios de n' voltam a assumir valores positivos, o que faz com que ocorra uma menor sensibilidade ao Endurecimento Dinâmico por Deformação e a Efeito Portevin-Le-Chatelier [13], além da ocorrência do efeito da recuperação a temperaturas elevadas uma vez que a partir de 600°C n' assume valores cada vez menores e se acentuando para 700°C.

Outra análise será realizada com a introdução da Figura 4.11 que retrata o comportamento do Coeficiente de Resistência (K') com o logaritmo da Taxa de Deformação na faixa de temperatura ambiente a 450°C.

Na Figura 4.11 nota-se a existência de discrepâncias mais acentuadas dos dados do Coeficiente de Resistência com o Log (Taxa de deformação s^{-1}) nas temperaturas de 200°C, 300°C e 400°C, onde ocorre uma inversão acentuada que confirma a ocorrência dos fenômenos mencionados com relação ao expoente de encruamento.

A Figura 4.12 apresenta a variação do Expoente de Encruamento com a temperatura para os diferentes níveis de velocidade de tração investigados.

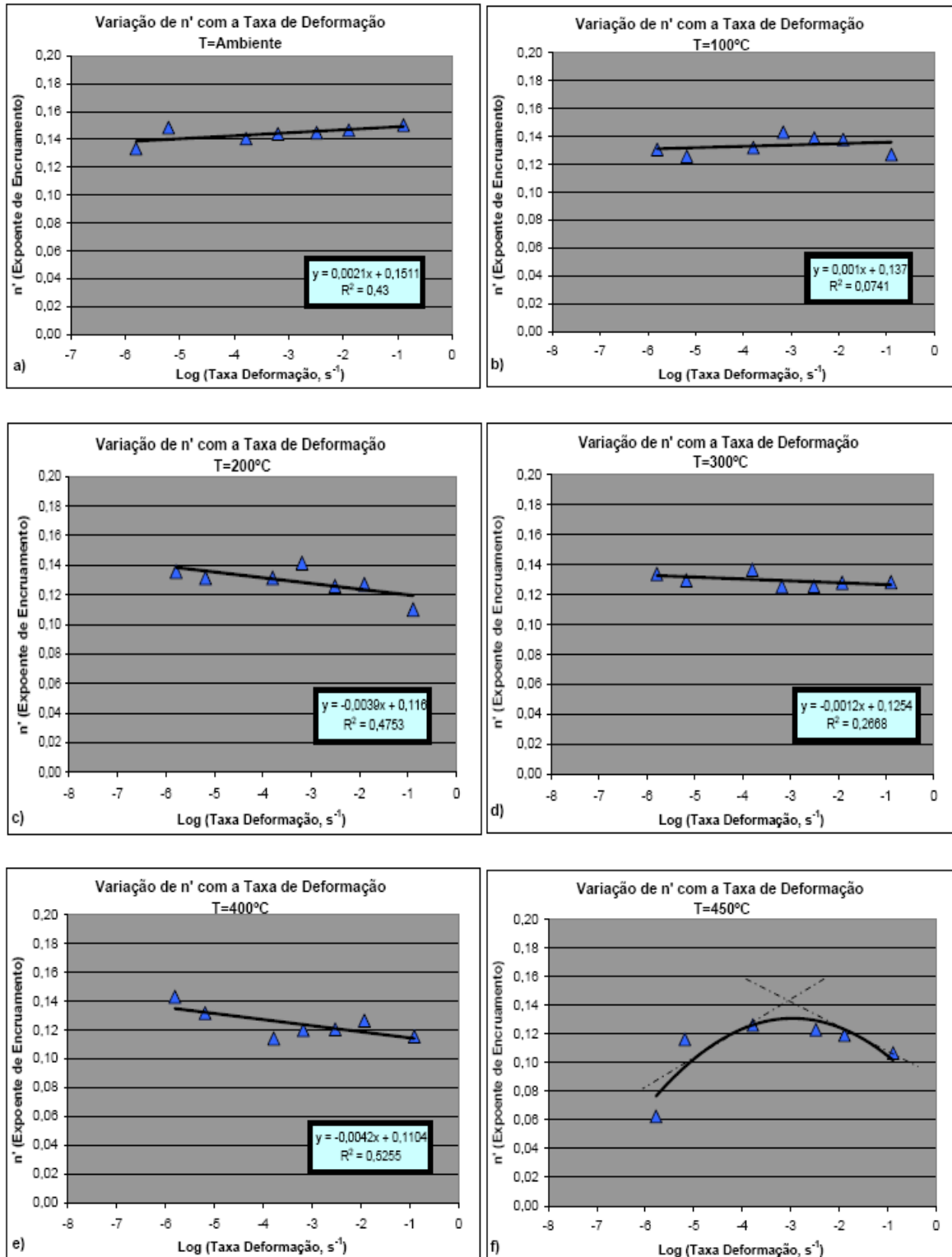


Figura 4.10 Gráficos da variação de n' (Expoente de Encruamento) com a Taxa de Deformação para: a) Temperatura Ambiente; b) 100°C; c) 200°C; d) 300°C; e) 400°C e f) 450°C.

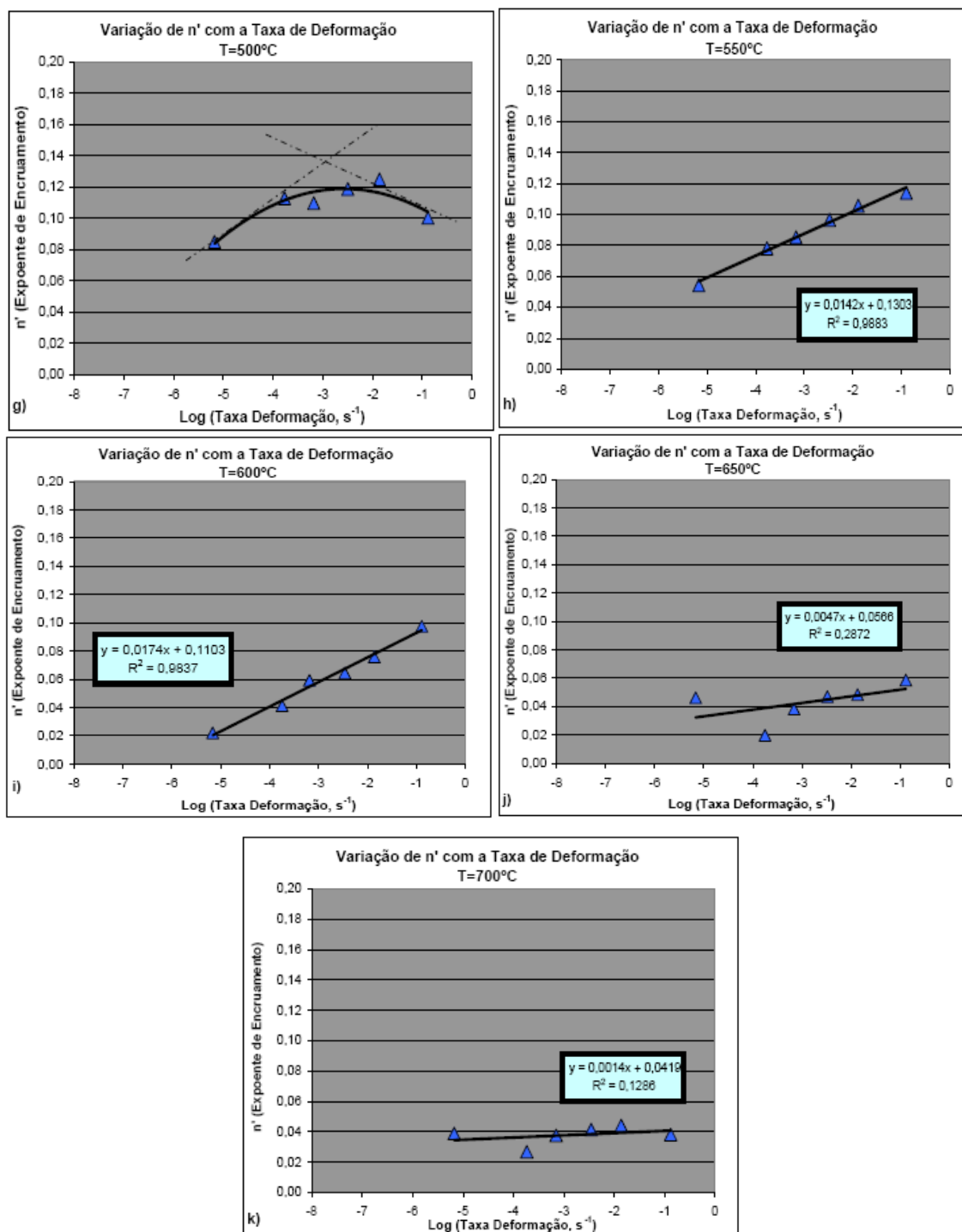


Figura 4.10 Gráficos da variação de n' (Expoente de Encruamento) com Taxa de Deformação em: g) $500^{\circ}C$; h) $550^{\circ}C$; i) $600^{\circ}C$; j) $650^{\circ}C$; k) $700^{\circ}C$.

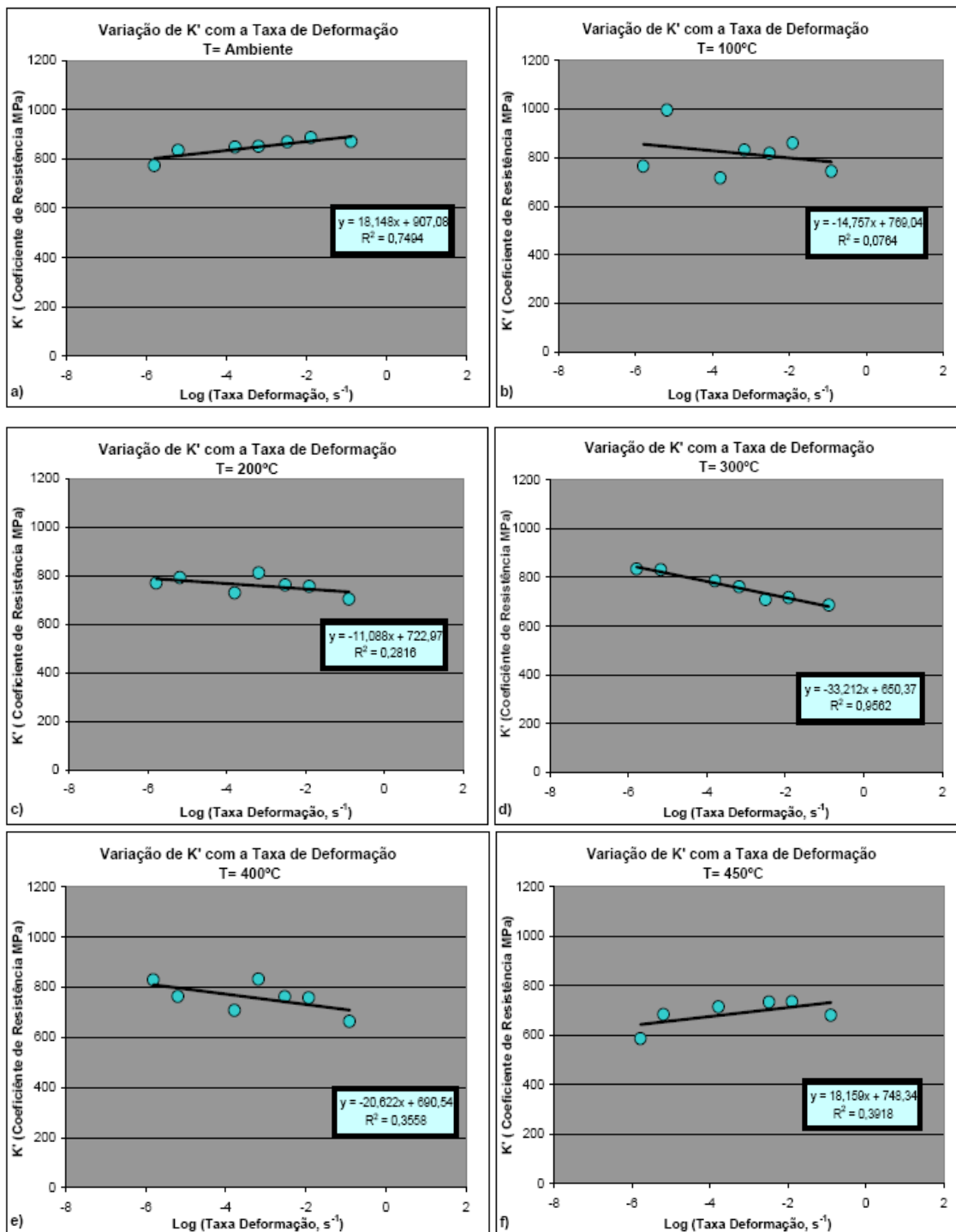


Figura 4.11 Variação do Coeficiente de Resistência K' com o Logaritmo da Taxa de Deformação para: a) Temperatura Ambiente; b) 100°C; c) 200°C; d) 300°C; e) 400°C e f) 450°C.

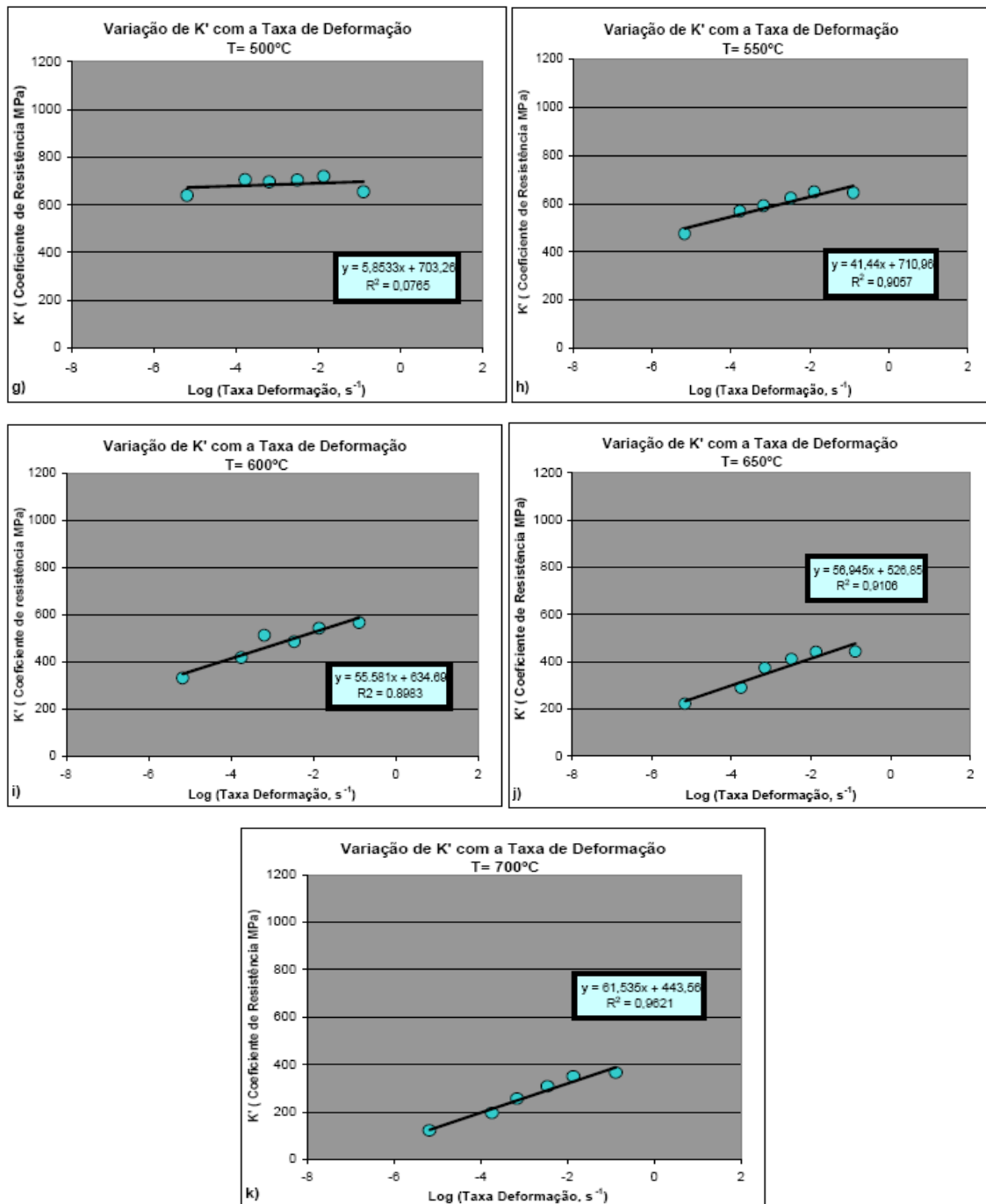


Figura 4.11 Variação do Coeficiente de Resistência K' com o Logaritmo da Taxa de Deformação: g) 500°C; h) 550°C; i) 600°C; j) 650°C e k) 700°C.

Mediante a análise da Figura 4.12 e dos dados referentes à Tabela 4.1 pode-se observar que os valores de n' para as temperaturas entre 25°C e 700°C permanecem na faixa de 0,10 a 0,15, porém ocorrem algumas inversões nos valores de n' em virtude do Endurecimento Dinâmico por Deformação que atua em temperaturas e velocidades de tração específicas.

Torna-se importante ressaltar que os valores obtidos por Reis Sobrinho [9] nas mesmas velocidades de tração (à temperatura ambiente e na faixa de 500°C a 700°C) e também os novos ensaios realizados neste trabalho (na faixa de 25°C a 700°C), vêm confirmar a informação que o Expoente de Encruamento n' tem o seu valor reduzido com o aumento da temperatura.

A Figura 4.13 apresenta a variação do Coeficiente de Resistência (K') com a temperatura para as diferentes velocidades de tração.

Os valores de K' em sua maioria variam de 700 a 800 MPa, para a faixa de temperatura que vai do ambiente até 450°C. Entre 500 até 700°C ocorre uma queda acentuada nos valores de K' , porém esta queda é mais acentuada para $V_T=0,01$ e $V_T=0,25$ mm/min nas temperaturas de 550 a 700°C. Tanto este dado como as inversões de algumas curvas são reflexos do Endurecimento Dinâmico por Deformação.

A Figura 4.14 introduzida a seguir, traz o comportamento de m' com relação ao logaritmo da Tensão de Escoamento versus o logaritmo da Deformação Nominal, para todas as temperaturas.

Na Figura 4.15 teremos o conjunto de gráficos referentes ao comportamento de m' com relação ao logaritmo do Limite de Resistência a Tração versus o logaritmo da Deformação Nominal, para todas as temperaturas.

A Tabela 4.2. apresenta os valores médios de m' na Tensão de Escoamento e no Limite de Resistência.

Tabela 4.1 Variação dos valores de n' e K' nas diversas condições de Temperatura e Velocidade de Tração deste trabalho.

VT	T(°C)	n'	K'	VT	T(°C)	n'	K'
0,0025	25	0,134	773,04	0,0025	100	0,131	764,89
0,01	25	0,149	834,07	0,01	100	0,126	787,59
0,25	25	0,141	847,62	0,25	100	0,132	715,65
1	25	0,144	850,16	1	100	0,143	830,23
5	25	0,145	868,16	5	100	0,139	816,39
20	25	0,147	885,93	20	100	0,138	860,20
200	25	0,151	869,16	200	100	0,141	776,07
0,0025	200	0,136	769,31	0,0025	300	0,134	834,45
0,01	200	0,131	790,86	0,01	300	0,130	831,38
0,25	200	0,131	728,12	0,25	300	0,137	785,42
1	200	0,142	811,33	1	300	0,125	761,55
5	200	0,126	761,38	5	300	0,126	708,92
20	200	0,127	755,27	20	300	0,128	716,97
200	200	0,110	702,43	200	300	0,128	686,44
0,0025	400	0,143	828,90	0,0025	450	0,077	616,88
0,01	400	0,132	763,66	0,01	450	0,116	682,50
0,25	400	0,116	712,20	0,25	450	0,126	713,51
1	400	0,120	831,76	1	450	0,136	748,69
5	400	0,120	762,61	5	450	0,123	732,49
20	400	0,127	756,83	20	450	0,119	734,01
200	400	0,116	664,05	200	450	0,120	711,54
0,01	500	0,085	639,15	0,01	550	0,054	474,35
0,25	500	0,113	704,90	0,25	550	0,078	567,28
1	500	0,110	695,83	1	550	0,085	589,52
5	500	0,119	703,88	5	550	0,097	621,87
20	500	0,125	719,45	20	550	0,106	647,74
200	500	0,107	671,12	200	550	0,114	644,76
0,01	600	0,022	328,93	0,01	650	0,044	219,03
0,25	600	0,041	416,20	0,25	650	0,034	311,24
1	600	0,059	510,39	1	650	0,038	372,81
5	600	0,065	483,50	5	650	0,047	410,49
20	600	0,076	541,00	20	650	0,049	440,05
200	600	0,098	565,46	200	650	0,059	441,98
0,01	700	0,039	122,43				
0,25	700	0,027	195,93				
1	700	0,038	255,98				
5	700	0,041	308,89				
20	700	0,044	350,27				
200	700	0,038	365,26				

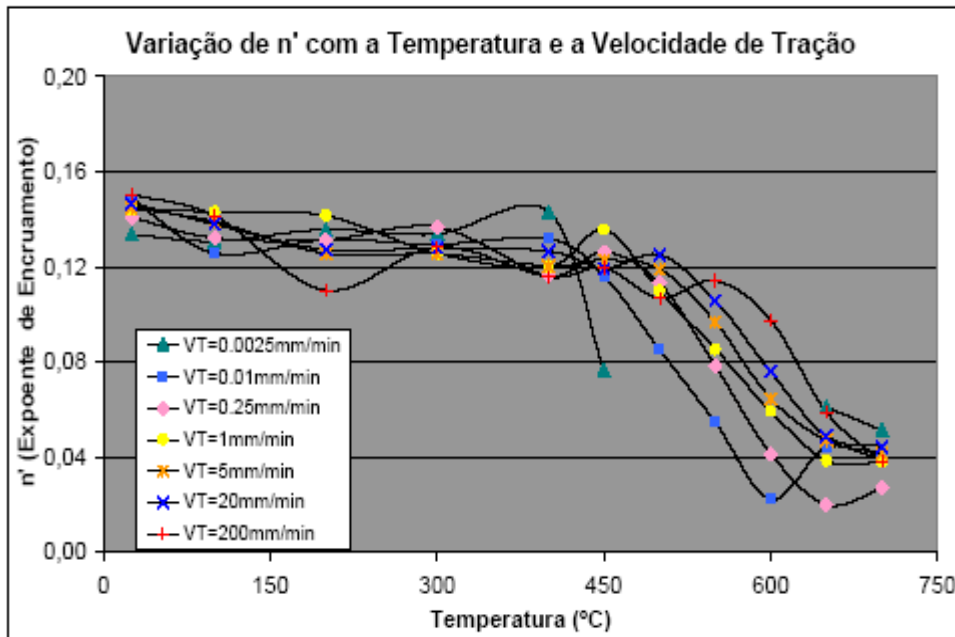


Figura 4.12 Variação do Expoente de Encruamento em diferentes níveis de Velocidades de Tração desde a temperatura ambiente até 700°C.

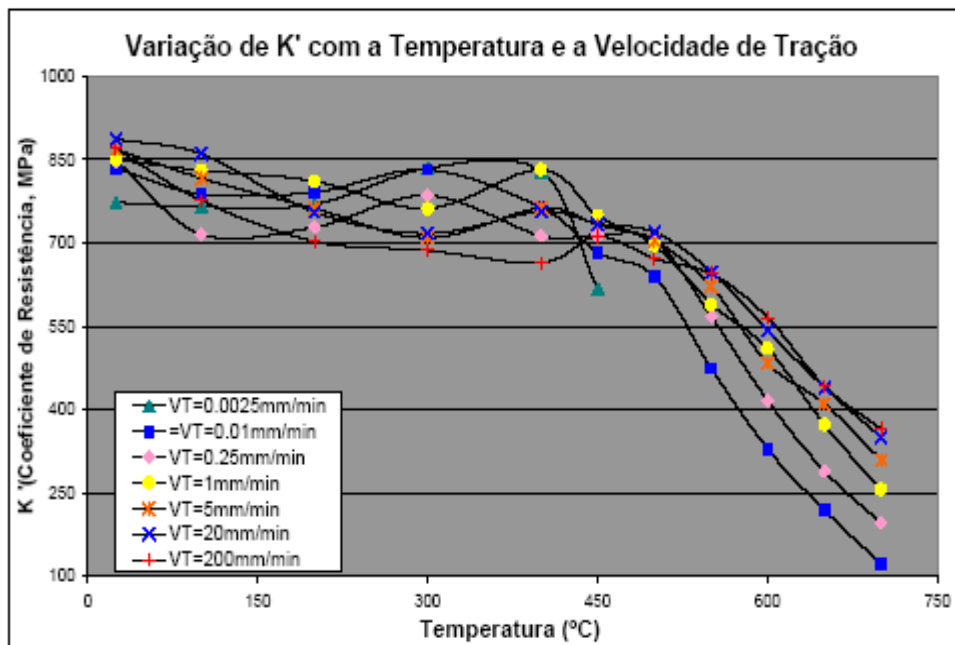


Figura 4.13 Variação do Coeficiente de Resistência com a Temperatura para as diferentes Velocidades de Tração.

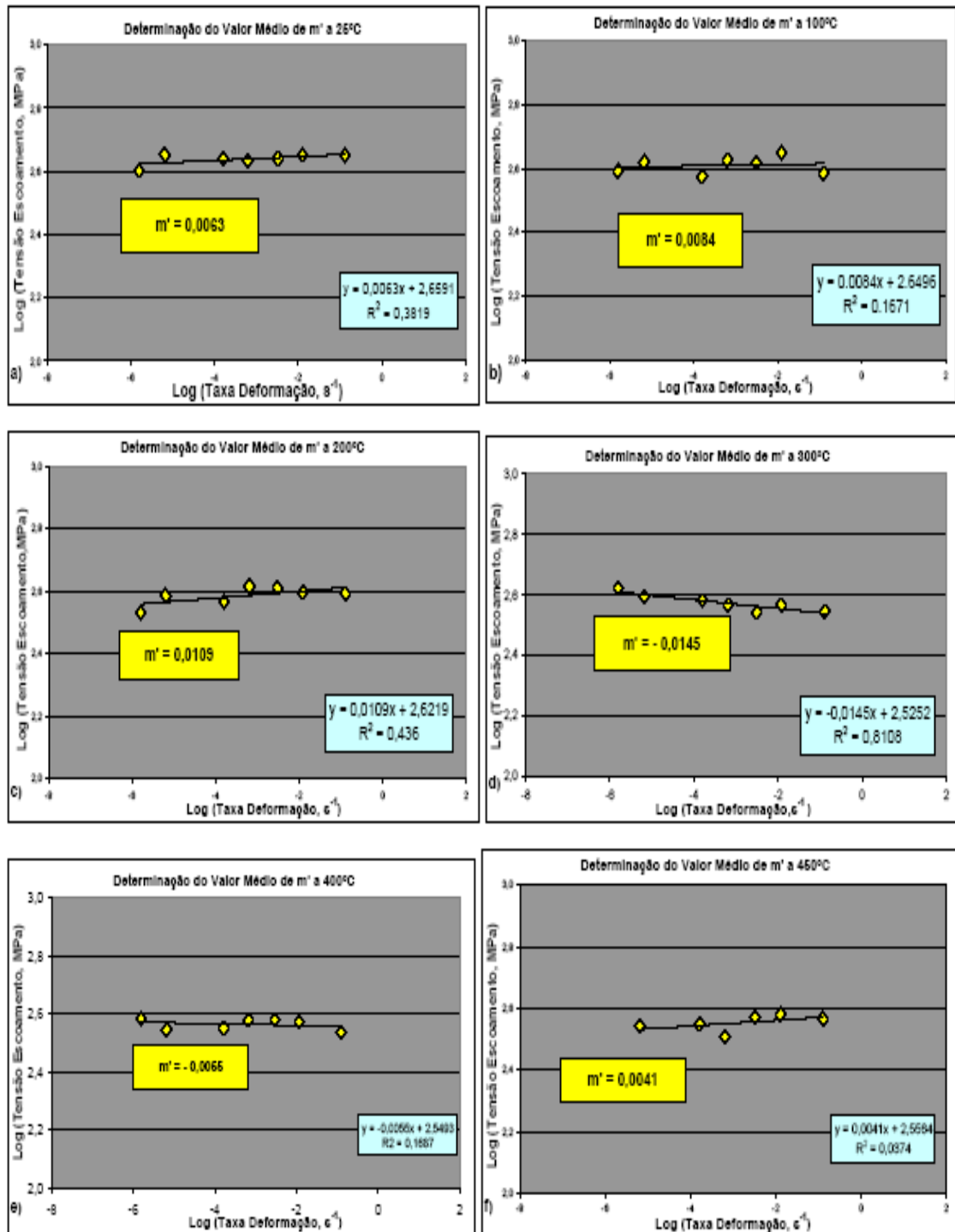


Figura 4.14 Variação do Logaritmo da Tensão de Escoamento com logaritmo da Taxa de Deformação: a) Temperatura Ambiente; b) 100°C; c) 200°C; d) 300°C; e) 400°C; f) 450°C

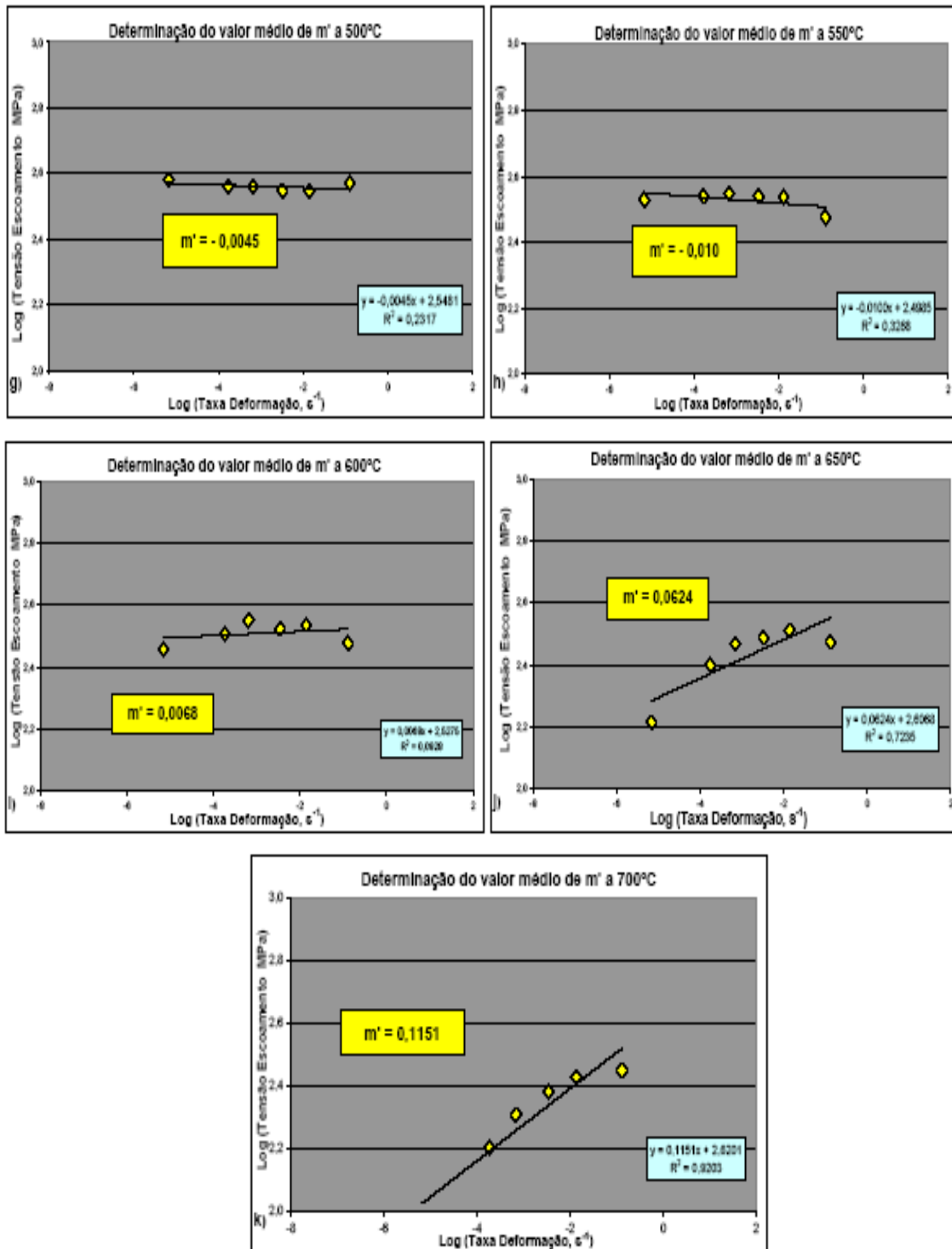


Figura 4.14 Variação do logaritmo da Tensão de Escoamento com logaritmo da Taxa de Deformação: g) 500°C; h) 550°C; i) 600°C; j) 650°C e k) 700°C.

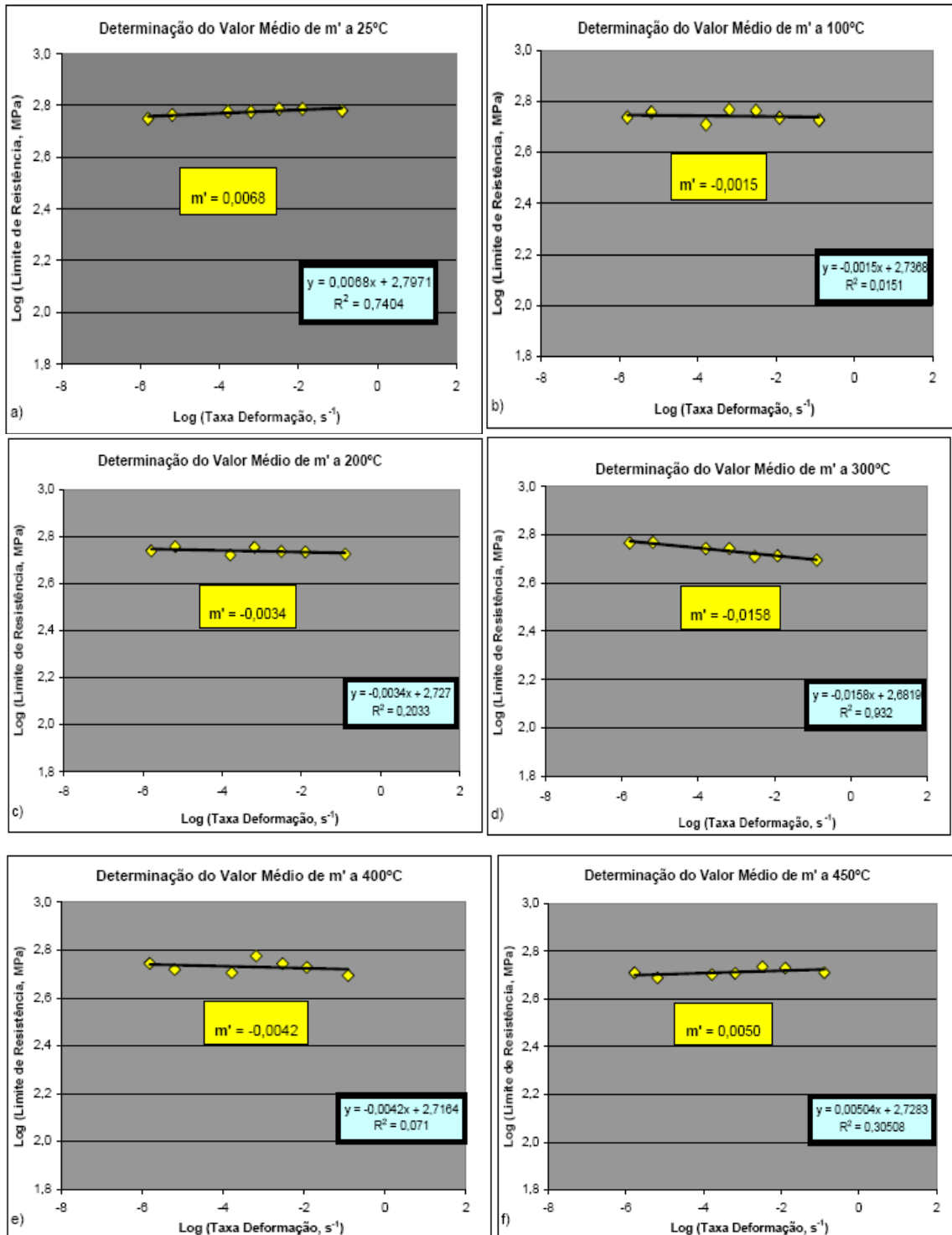


Figura 4.15 Variação do Logaritmo do Limite de Resistência à Tração com o logaritmo da Taxa de Deformação: a) Temperatura Ambiente; b) 100°C; c) 200°C; d) 300°C; e) 400°C e f) 450°C.

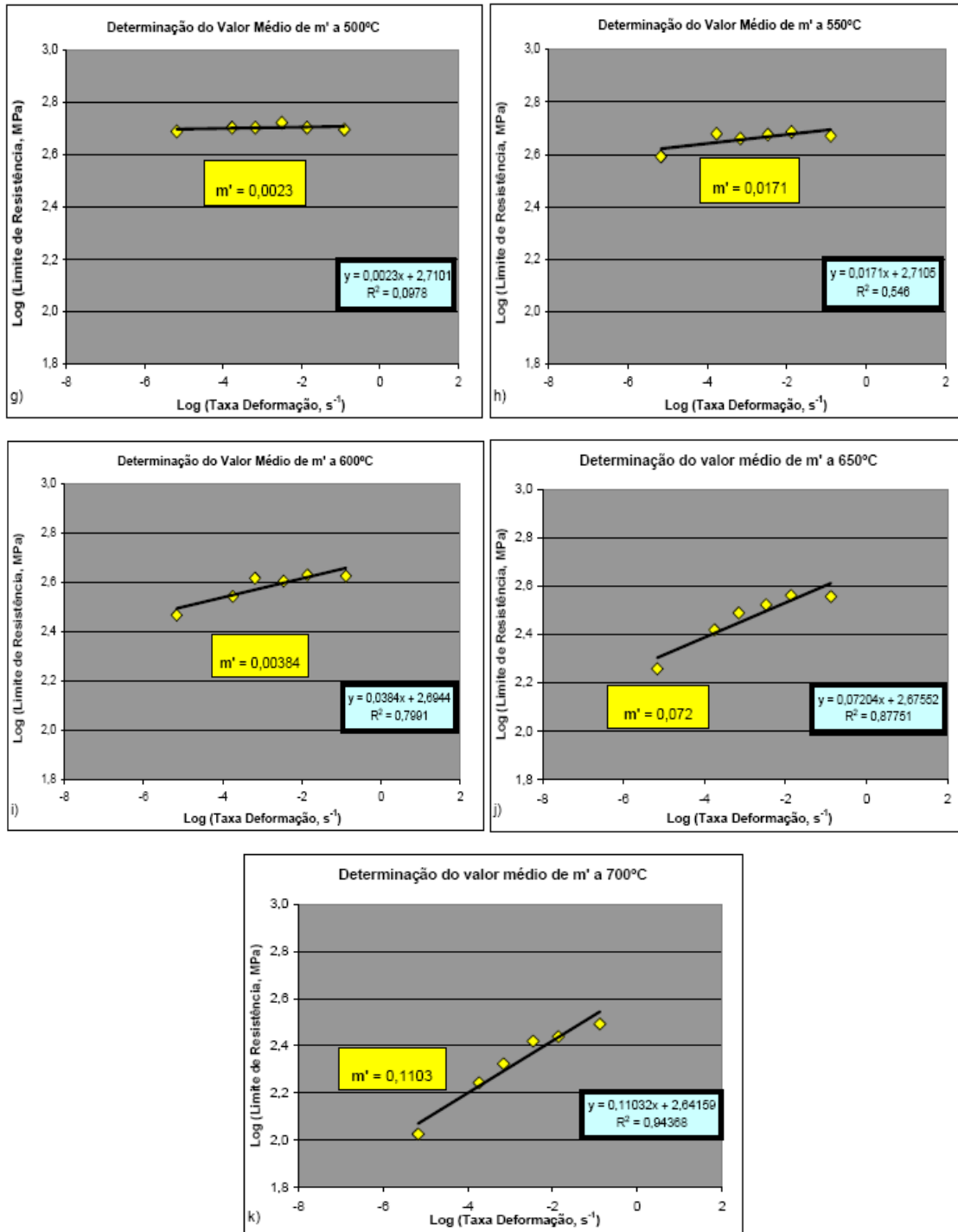


Figura 4.15 Variação do logaritmo do Limite de Resistência à Tração com o logaritmo da taxa de deformação: g) 500°C; h) 550°C; i) 600°C; j) 650°C e k) 700°C.

Tabela 4.2 Valores do expoente de sensibilidade do Limite de Resistência e da Tensão de Escoamento com a taxa de deformação

Valores Médios na Tensão Escoamento			Valores Médios no Limite de Resistência (LRT)		
T (°C)	m'	C'	T (°C)	m'	C'
25	0,0063	456,14	25	0,0068	588,57
100	0,0084	446,27	100	-0,0015	545,51
200	0,0109	418,70	200	-0,0034	528,08
300	-0,0145	335,12	300	-0,0158	480,73
400	-0,0055	354,24	400	-0,0042	520,48
450	0,0041	360,08	450	0,0050	534,93
500	-0,0045	358,43	500	0,0023	512,98
550	-0,0100	315,14	550	0,0171	513,45
600	0,0068	336,90	600	0,0384	494,77
650	0,0624	404,39	650	0,0720	473,72
700	0,1151	416,97	700	0,1103	438,12

Com base nas Figuras 4.14, 4.15 e na Tabela 4.2 podemos confirmar que para as temperaturas na faixa de 25°C a 700°C existem faixas de temperatura específicas onde ocorre sensibilidade negativa à Taxa de Deformação.

Para a Tensão de Escoamento esse efeito parece ocorrer em toda faixa de 300°C até 550°C. Já para o Limite de Resistência, o efeito ocorre apenas entre 100°C e 400°C; Tudo indica que o fenômeno do EDD é o responsável pela inversão da inclinação das retas dos gráficos das Figuras 4.14 e 4.15, tanto para a Tensão de Escoamento, como para o Limite de Resistência.

As Figuras 4.16a e 4.16b apresentam a variação do Expoente de Sensibilidade com a Taxa de Deformação para a Tensão de Escoamento e o Limite de Resistência respectivamente com a temperatura.

Através das Figuras 4.16a e b e dos valores de m' contidos na Tabela 4.2 é possível identificar as regiões de temperatura onde a Sensibilidade à Taxa de Deformação se tornam negativas.

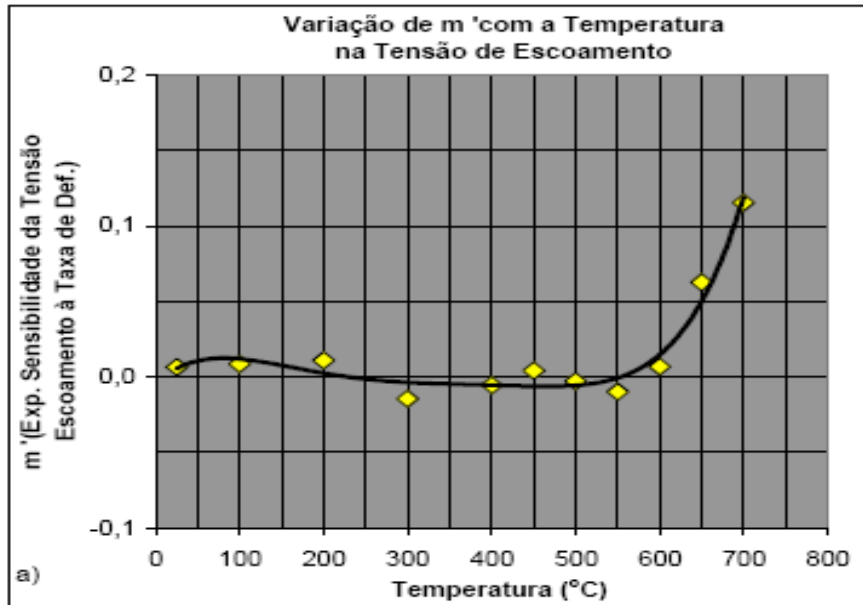


Figura 4.16 a) Variação de m' com a temperatura na Tensão de Escoamento.

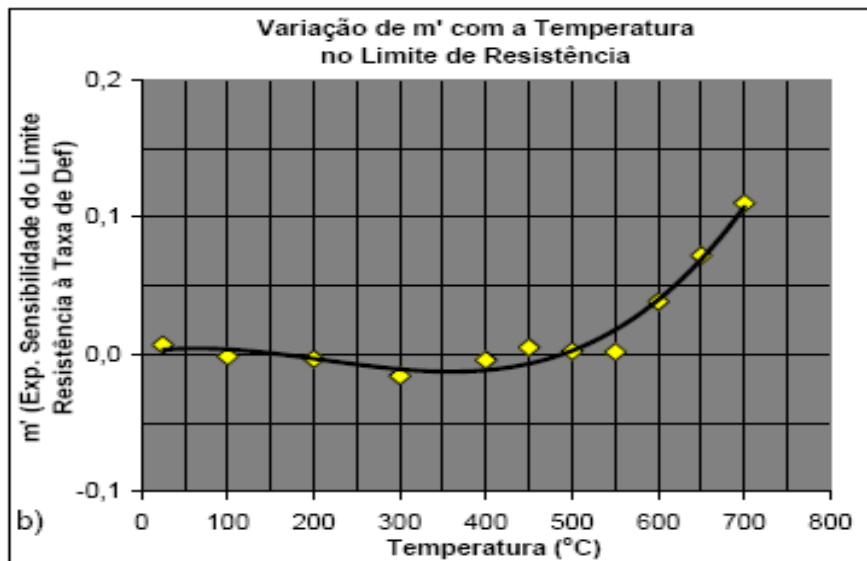


Figura 4.16 b) Variação de m' com a temperatura no Limite de Resistência.

Os valores de m' decrescem com a redução da temperatura na faixa de 550°C a 700°C para a Tensão de Escoamento e para o Limite de Resistência este fato ocorre na faixa de temperatura de 300°C a 700°C, confirmando a influência que a temperatura exerce em m' . Este fato torna-se um bom indicativo das mudanças comportamentais apresentadas pelo material, através

da relação da velocidade de movimentação das discordâncias com a tensão aplicada.

As Figuras 4.17 relacionam a variação de C' com a temperatura, assim na Figura 4.17 a) na Tensão de Escoamento e Figura 4.17 b) no Limite de Resistência.

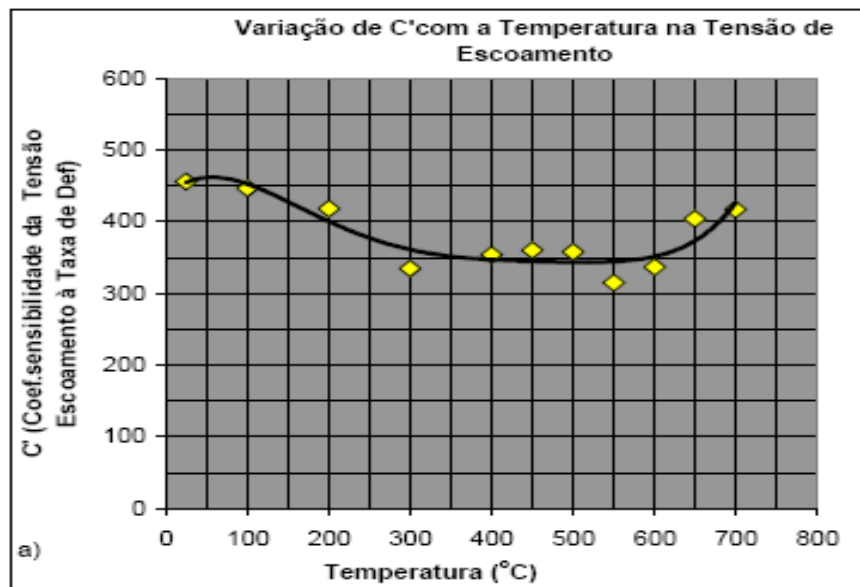


Figura 4.17 a) Variação da constante C' com a temperatura para a Tensão de Escoamento.

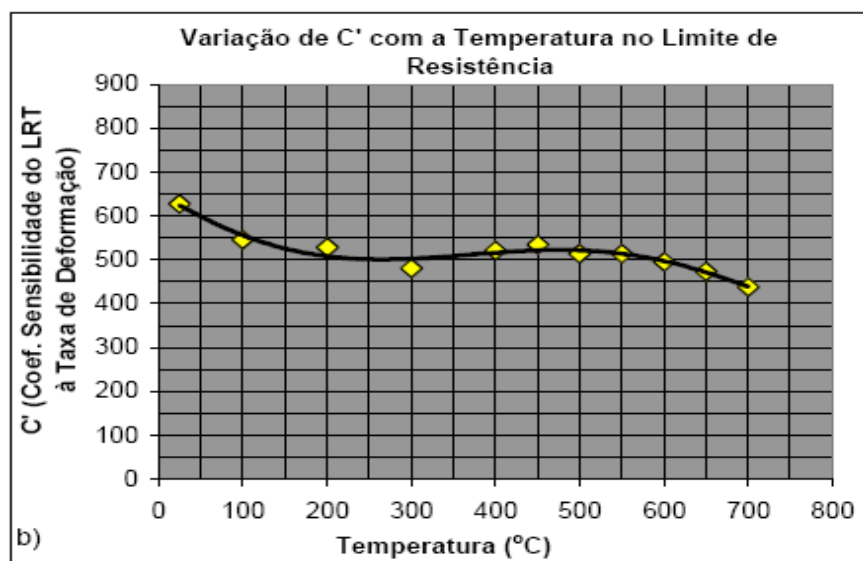


Figura 4.17 b) Variação da Constante C' com a temperatura para o Limite de Resistência.

4.2 Análise de novos dados no Aço 2,25C4-1Mo visando à confirmação do critério de equivalência entre tração a quente e fluência

4.2.1 Considerando-se os ensaios complementares realizados neste trabalho

A fim de se comprovar o critério de equivalência proposto [45], fez-se necessária a realização de novos ensaios para que fosse possível avaliar a confiabilidade do critério para uma gama maior de dados em outras situações experimentais.

A Figura 4.18 mostra os novos dados analisados em conjunto com os dados de Reis Sobrinho [9] quando plotados segundo a Taxa Mínima de Fluência com a Tensão para cada nível de temperatura. Todos os dados de tração foram convertidos para fluência usando o critério proposto.

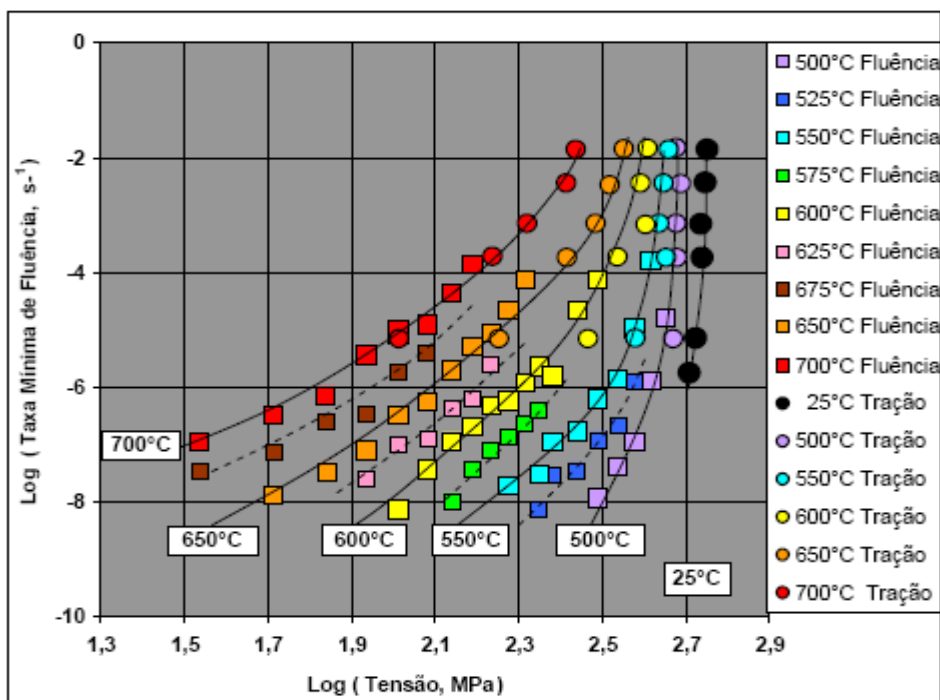


Figura 4.18 Variação da Taxa Mínima de Fluência com a Tensão para os resultados de fluência e tração convertidos pelo Critério de Equivalência.

A Figura 4.19 mostra o comportamento dos dados de fluência e tração quando se plotam a Taxa Mínima de Fluência com os Tempos de Ruptura utilizando o critério de conversão. O gráfico mostra também os dados de fluência relatados por Viswanathan [53], para o mesmo material.

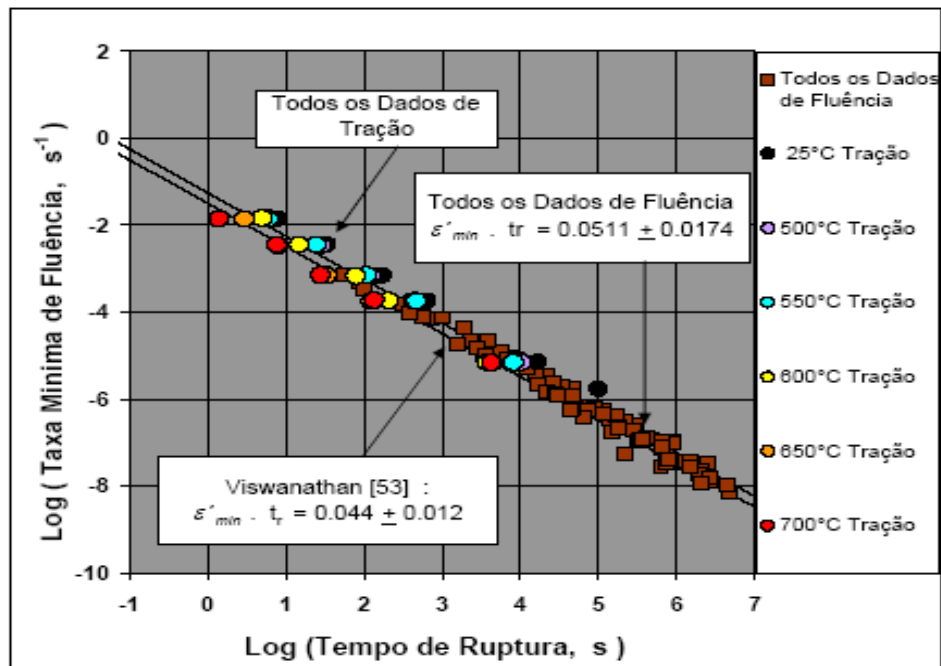


Figura 4.19 Variação da Taxa Mínima de Fluência com o Tempo de Ruptura para os resultados de fluência e os de tração convertidos pelo critério de equivalência e comparados com os dados de fluência de Viswanathan [53].

A Figura 4.20 apresenta a variação da Taxa Mínima de Fluência com o Inverso da Temperatura Absoluta retratando o comportamento dos dados de fluência e tração a quente.

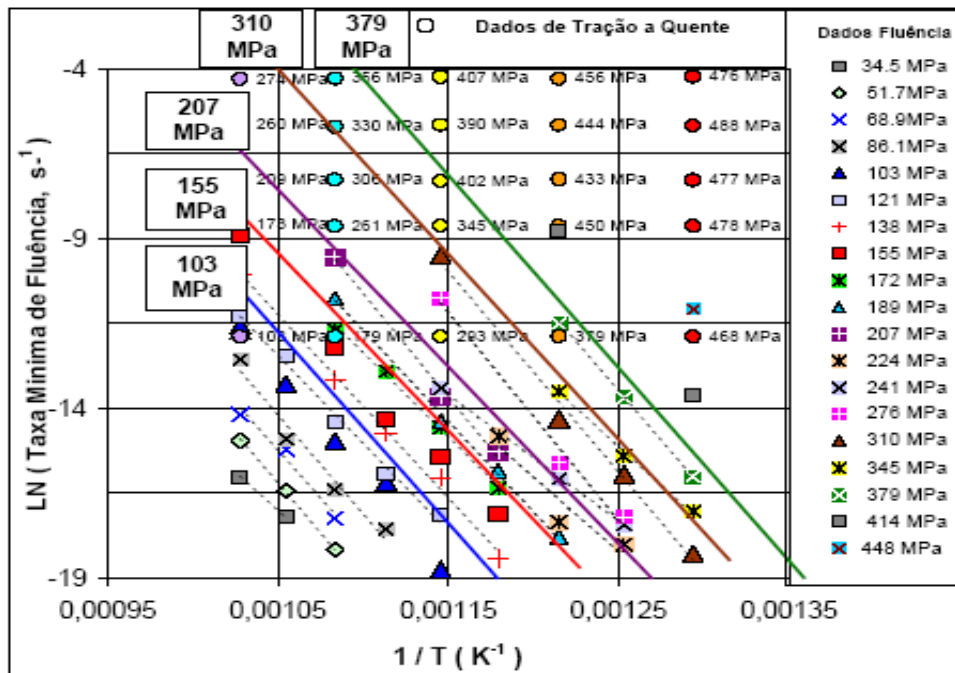


Figura 4.20 Variação da Taxa Mínima de Fluência com inverso Temperatura, para os resultados de fluência e tração convertidos pelo critério de equivalência.

A Figura 4.21 mostra a variação dos dados da Tensão com o Tempo de Ruptura para todos os ensaios de fluência e tração a quente.

Mediante a análise das Figuras 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21 temos um bom indicativo da validade do critério de equivalência, uma vez que existe concordância entre os dados de fluência e tração quando convertidos com base no critério.

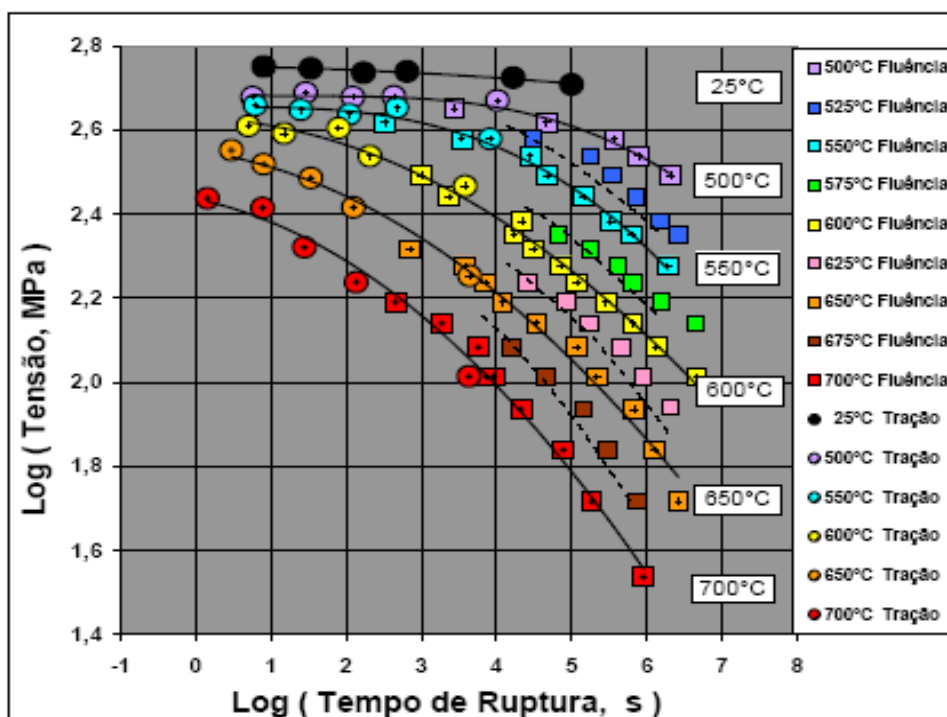


Figura 4.21 Variação da Tensão com o Tempo de Ruptura para os ensaios de fluência e os de tração convertidos pelo critério de equivalência.

4.2.2 Análise considerando os dados de outros autores

A análise do conjunto de dados obtidos por Klueh [50,51] e Klueh e Oakes [48] para tração e fluência proporcionam uma visão do comportamento do aço 2,25Cr-1Mo para 4 tipos diferentes de tratamentos térmicos (3 recozimentos com diferentes tipos de resfriamento e um tratamento de normalização seguido de revenimento).

Estes dados foram estudados segundo o critério de equivalência de Bueno e Reis Sobrinho [9,42,43], e tiveram seu comportamento avaliado mediante a sua aplicação segundo os diagramas de Norton [27], Monkman-Grant [28] e o diagrama de variação da resistência à fluência com o tempo de ruptura [9,42,43]. Isto pode ser visualizado com a apresentação das figuras abaixo, o que complementa o estudo para o aço 2,25Cr-1Mo e confirma o bom desempenho do critério de equivalência com os dados de outros autores.

a) Com o aço em três diferentes condições de Recozimento

i) Condição AN-1

A Figura 4.22 a apresenta o comportamento do aço 2,25Cr-1Mo com relação à Taxa Mínima de Fluência e a Tensão, segundo o Diagrama de Norton [27], para os dados obtidos por Klueh [50,51] e Klueh e Oakes [48] nos ensaios de tração e fluência, onde se podem observar um bom ajuste entre os dados de tração a quente e fluência.

A Figura 4.22 b apresenta a variação da Taxa Mínima de Fluência com o Tempo de Ruptura, verificando-se a relação de Monkman-Grant [28]. Nota-se novamente a boa concordância dos dados de tração a quente e fluência.

A Figura 4.22 c retrata o comportamento dos dados com relação à variação da Taxa Mínima de Fluência com o Tempo de Ruptura, seguindo o critério de equivalência proposto por Bueno e Reis Sobrinho [9,42,43], também apresenta uma boa correlação entre os dados.

ii) Condição AN-2

A Figura 4.23 a mostra o comportamento dos dados com relação ao diagrama de Norton retratando uma boa correlação entre os dados.

A Figura 4.23 b apresenta o comportamento dos dados de tração a quente e fluência segundo o diagrama de Monkman-Grant [28], indicando também boa concordância entre os dados.

Na Figura 4.23 c ilustra o comportamento dos dados de tração a quente e fluência com relação com relação critério de equivalência [9,42,43], neste caso os dados também se comportam de forma satisfatória.

iii) Condição I A

A Figura 4.24 a mostra a análise dos dados de tração e fluência seguindo o diagrama de Norton com boa correlação entre os dados de fluência e tração a quente.

A Figura 4.24b apresenta o comportamento dos dados segundo o diagrama de Monkman-Grant [28], indicando boa concordância entre eles.

Na Figura 4.24c o comportamento dos dados de tração a quente e fluência em relação ao critério de equivalência [9,42,43], apresentam também uma boa concordância com relação ao critério proposto.

a) Com o aço na condição Normalizado e Revenido

A análise dos dados de Klueh [50,51] e Klueh e Oakes [48] se encerra com o estudo dos dados do aço 2,25Cr-1Mo no estado Normalizado e Revenido.

A Figura 4.25a apresenta o comportamento dos dados de fluência e tração a quente para o diagrama de Norton, com boa correlação entre ambos. Na Figura 4.25b esta análise é realizada segundo o diagrama de Monkman-Grant [28], também com bons resultados, e na Figura 4.25c temos um desempenho satisfatório dos dados de fluência e tração com relação ao critério de equivalência.

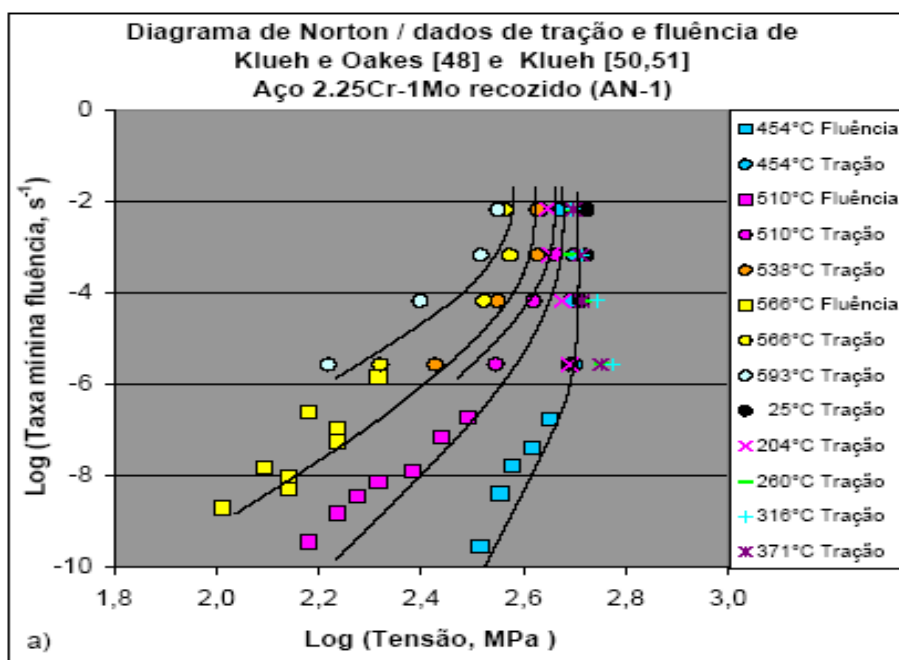


Figura 4.22 a) Variação da Taxa mínima de fluência com a Tensão para o aço 2,25Cr-1Mo na condição AN-1.

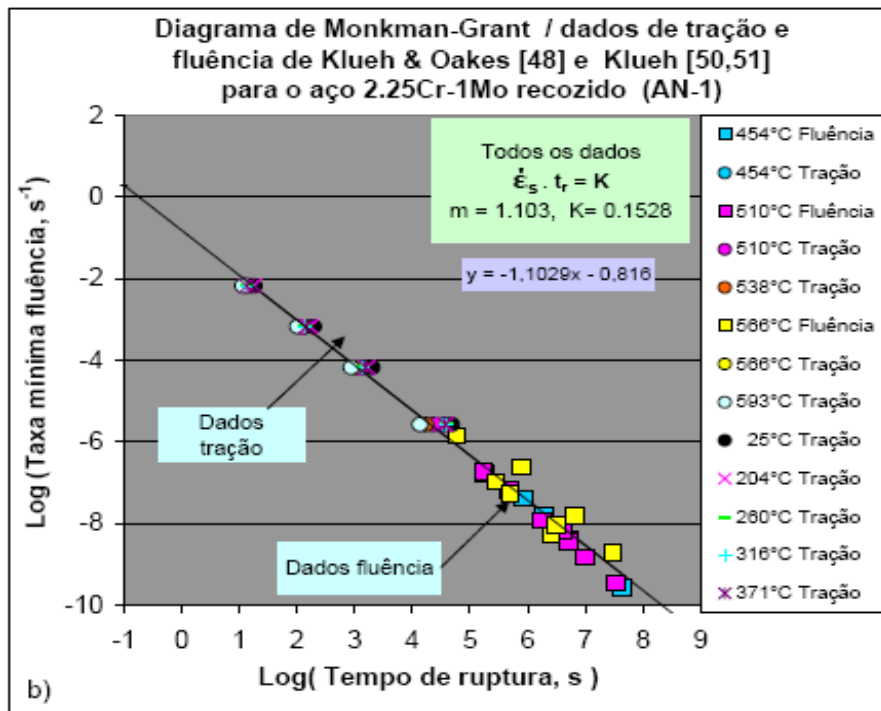


Figura 4.22 b) Variação da Taxa mínima de fluência com o Tempo de ruptura para o aço 2,25Cr-1Mo na condição AN-1.

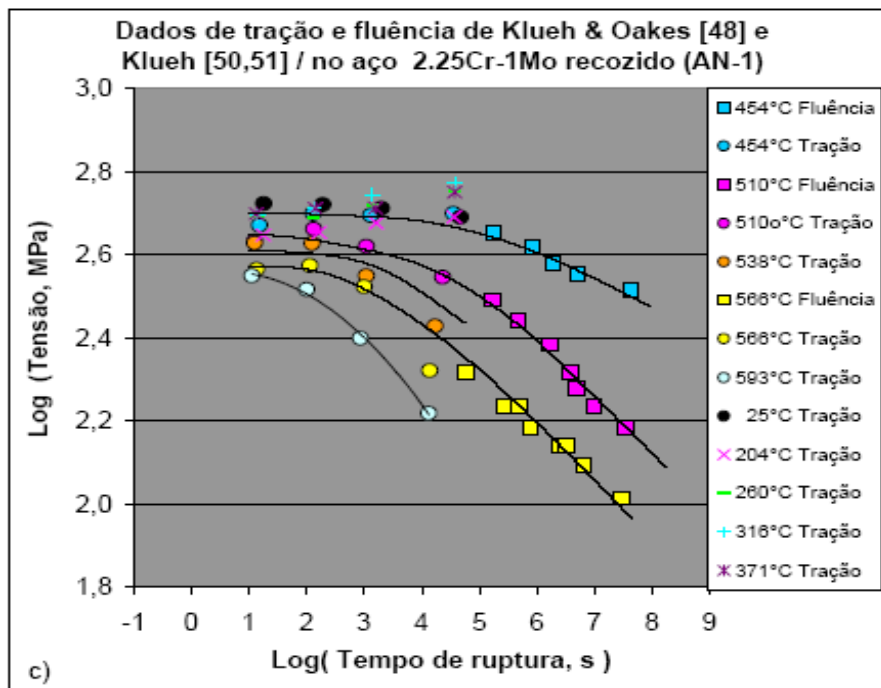


Figura 4.22 c) Variação da Resistência à fluência com a Tempo de ruptura para o aço 2,25Cr-1Mo na condição AN-1.

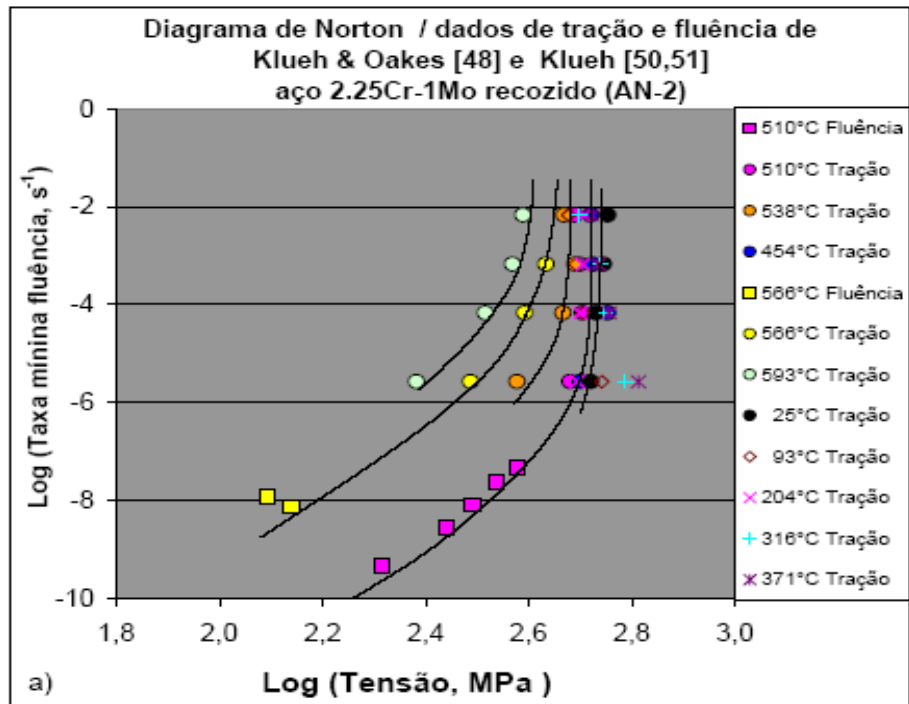


Figura 4.23 a) Variação da Taxa mínima de fluência com a Tensão para o aço 2,25Cr-1Mo na condição AN-2.

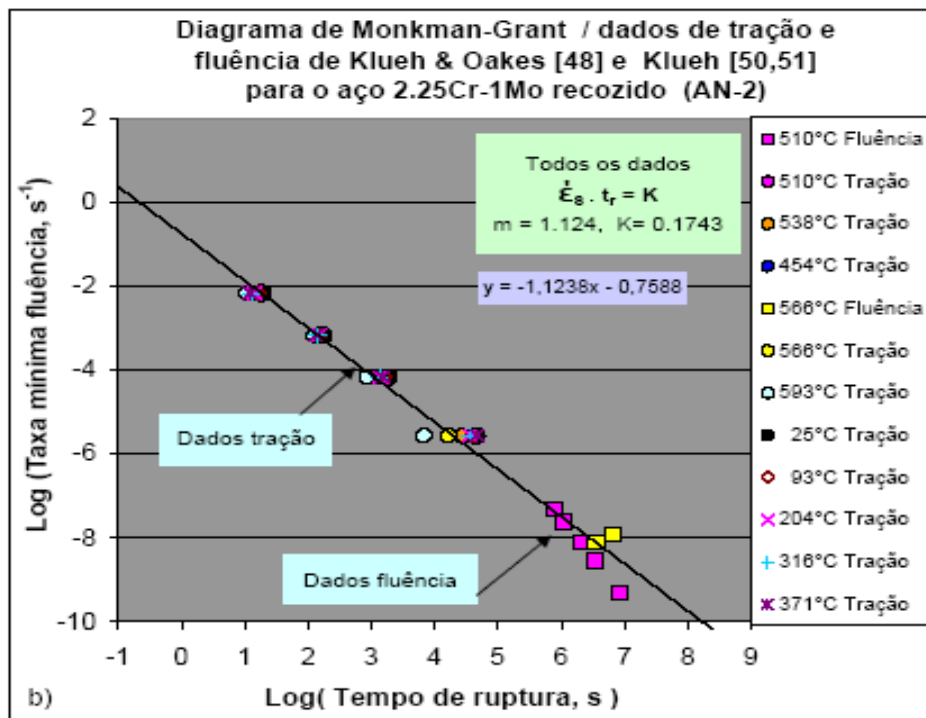


Figura 4.23 b) Variação da Taxa mínima de fluência com o Tempo de ruptura para o aço 2,25Cr-1Mo na condição AN-2.

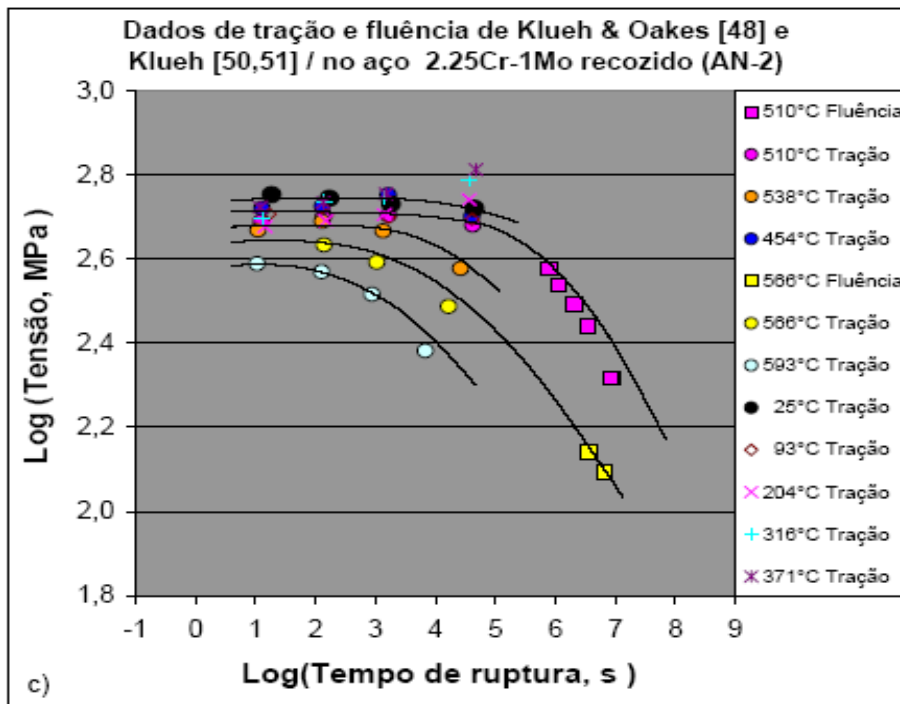


Figura 4.23 c) Variação da Resistência à fluência com a Tempo de ruptura para o aço 2,25Cr-1Mo na condição AN-2.

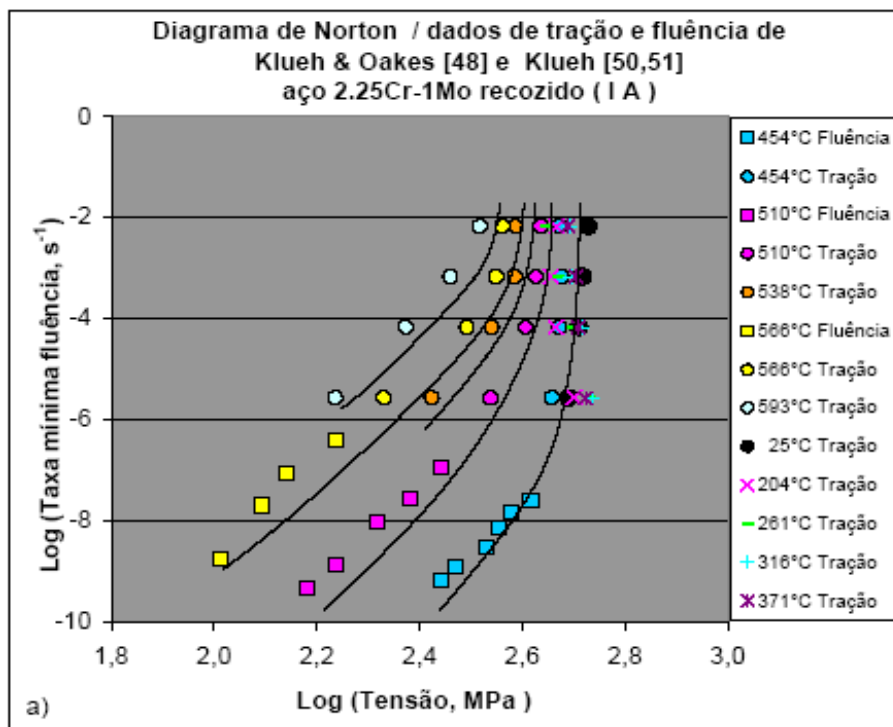


Figura 4.24 a) Variação da Taxa mínima de fluência com a Tensão para o aço 2,25Cr-1Mo na condição I A.

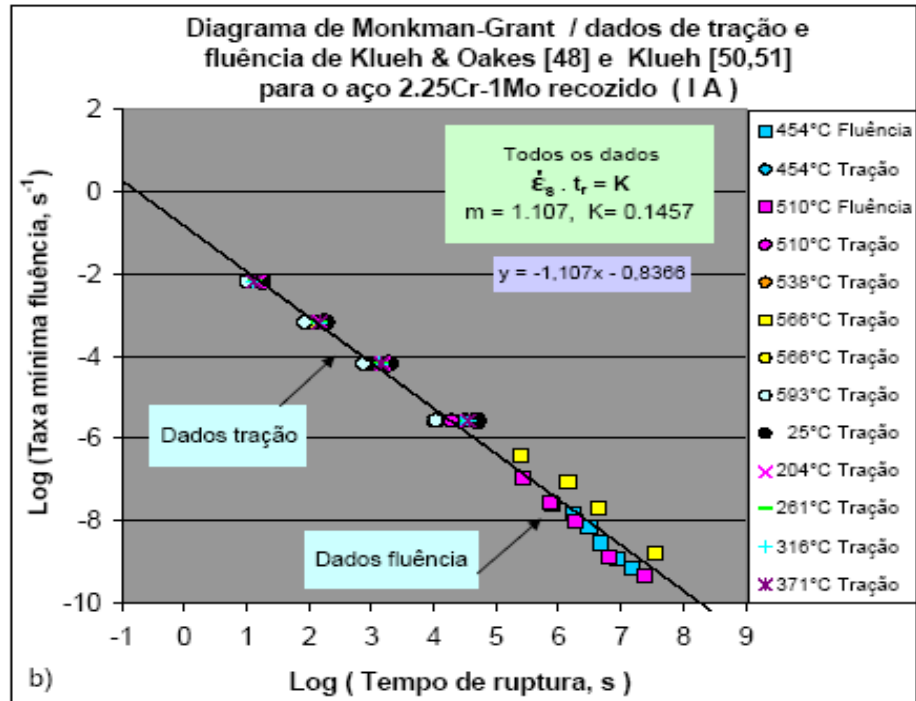


Figura 4.24 b) Variação da Taxa mínima de fluência com o Tempo de ruptura para o aço 2,25Cr-1Mo na condição I A.

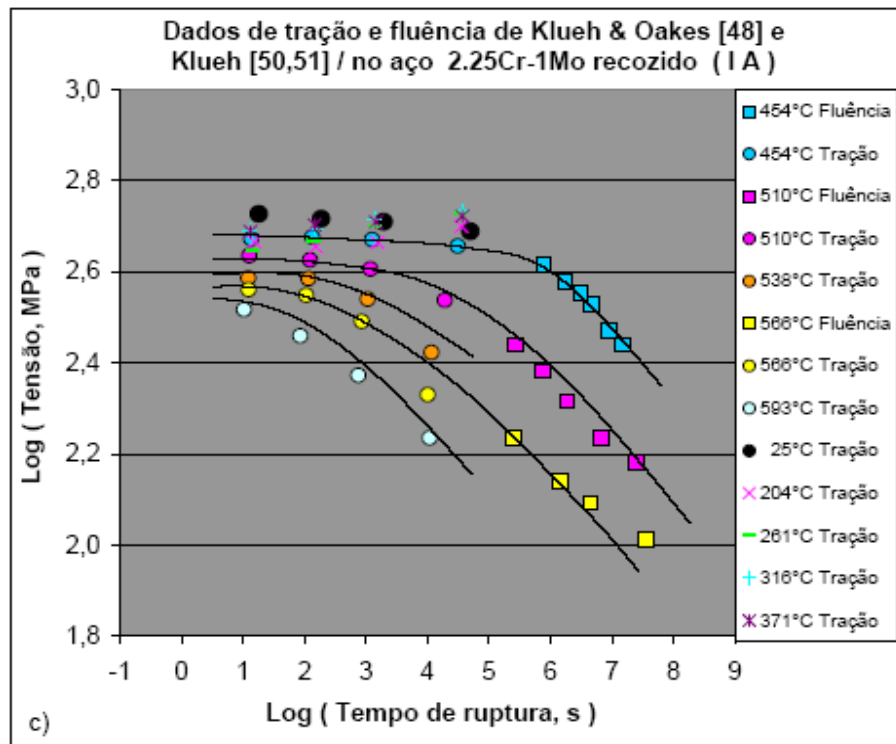


Figura 4.24 c) Variação da Resistência à fluência com a Tempo de ruptura para o aço 2,25Cr-1Mo na condição I A.

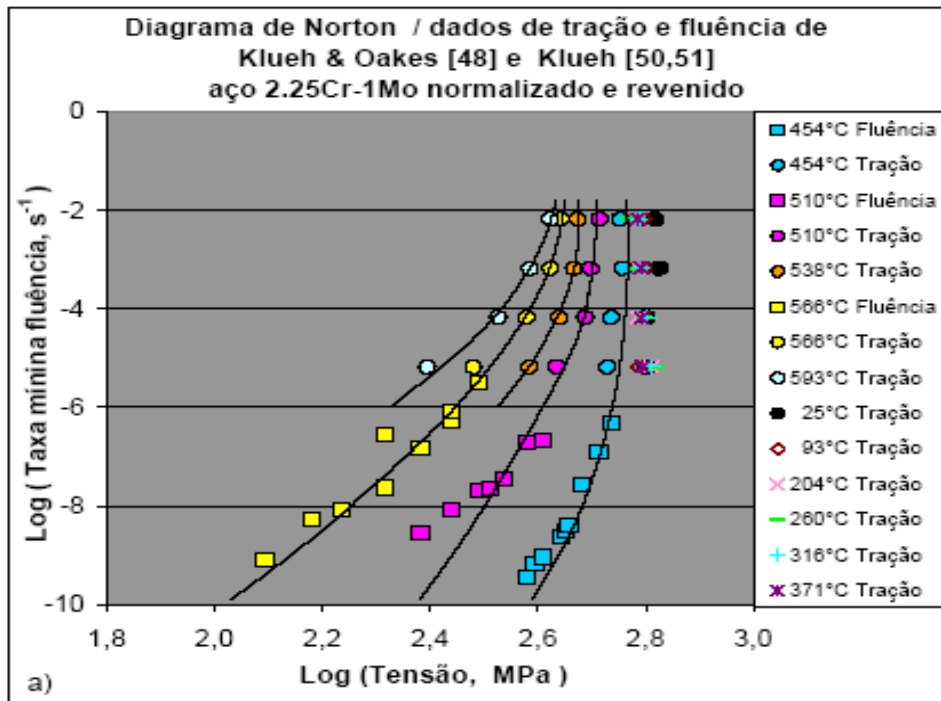


Figura 4.25 a) Variação da Taxa mínima de fluência com a Tensão para o aço 2,25Cr-1Mo na condição N + R.

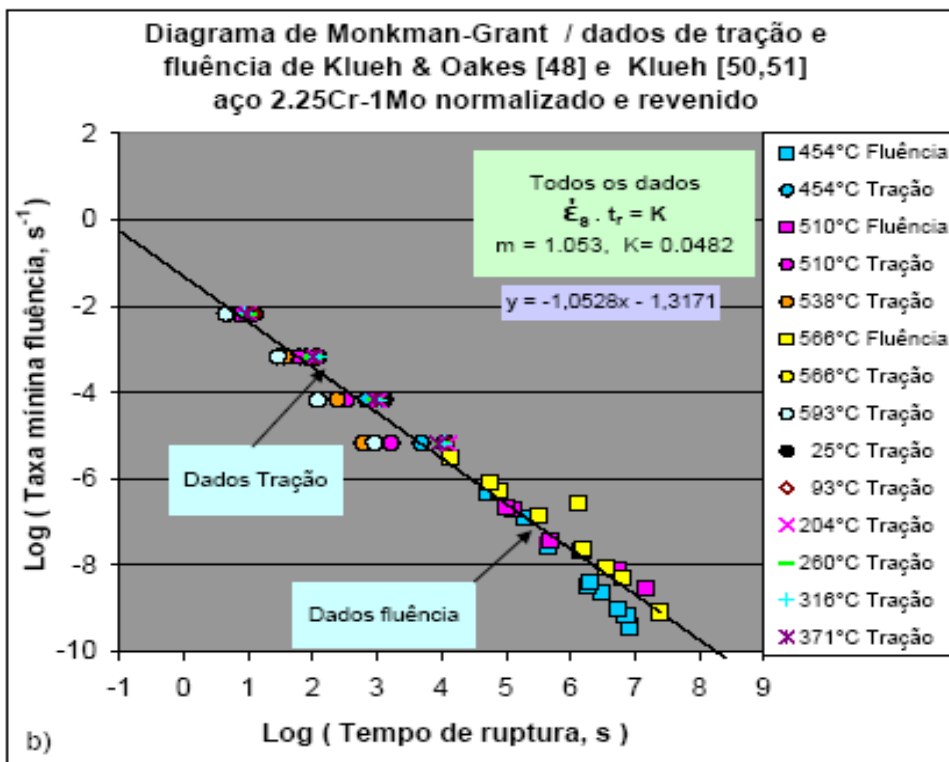


Figura 4.25 b) Variação da Taxa mínima de fluência com o Tempo de ruptura para o aço 2,25Cr-1Mo na condição N + R.

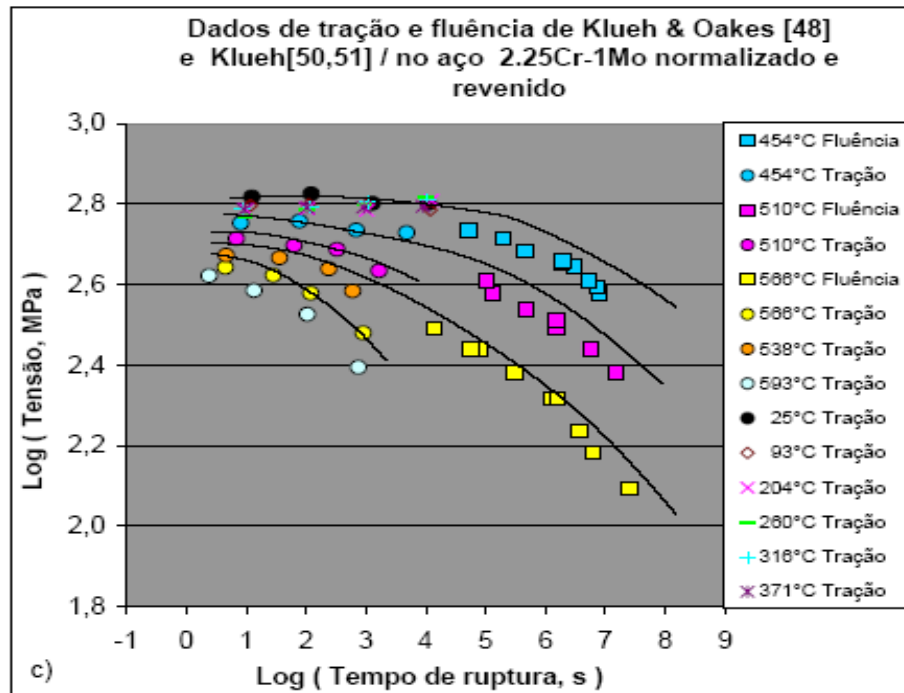


Figura 4.25 c) Variação da Resistência à fluência com a Tempo de ruptura para o aço 2,25Cr-1Mo na condição N + R.

4.2.3 Resultados de Equivalência no Aço Inoxidável Austenítico AISI -310

Visando comprovar o critério proposto por Reis Sobrinho e Bueno [9,42,43], a mesma metodologia de análise foi empregada também para os dados no aço AISI 310 – 700°C. A Figura 4.26, mostra as curvas de Tensão versus Deformação para o aço AISI 310 ensaiado a 700°C, em varias velocidades de tração.

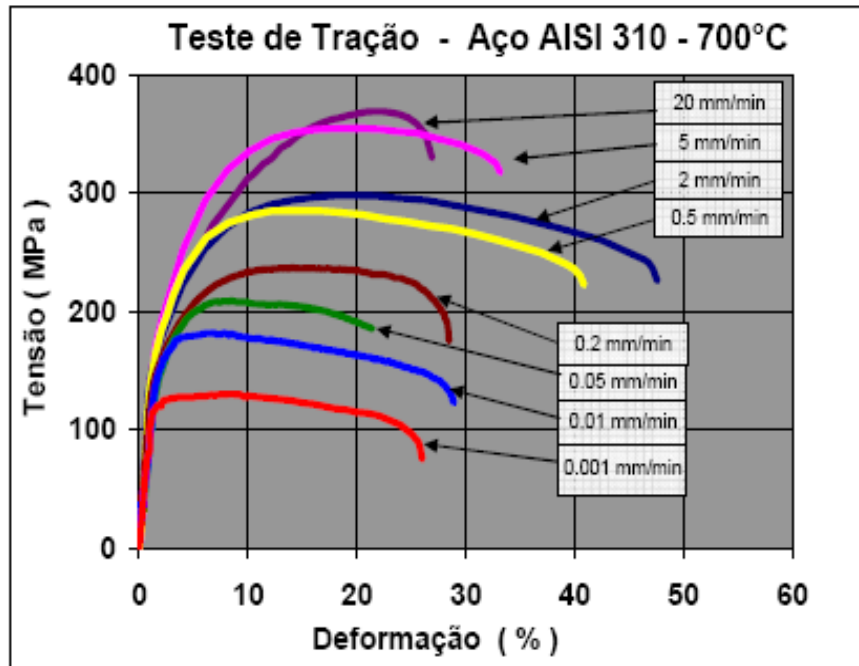


Figura 4.26 Gráfico de Tensão versus Deformação para os ensaios de tração no Aço AISI 310 a 700°C.

As Figuras 4.27 a, b e c apresentam as curvas de fluência Deformação versus Tempo para os diferentes níveis de tensão aplicados nos ensaios.

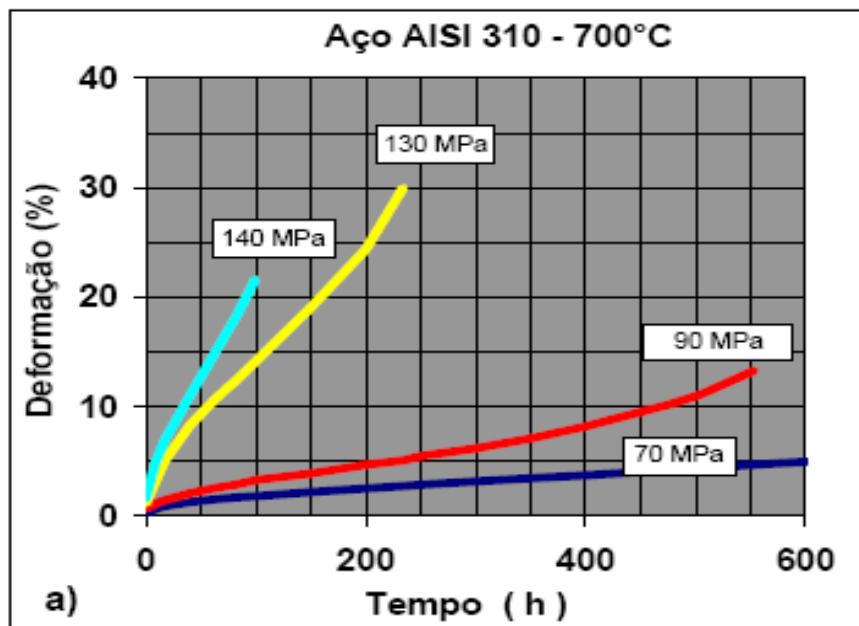


Figura 4.27 a) Gráfico de Deformação versus Tempo para o aço AISI 310 a 700°C para as tensões de: 70 MPa, 90 MPa, 130 MPa e 140 MPa.

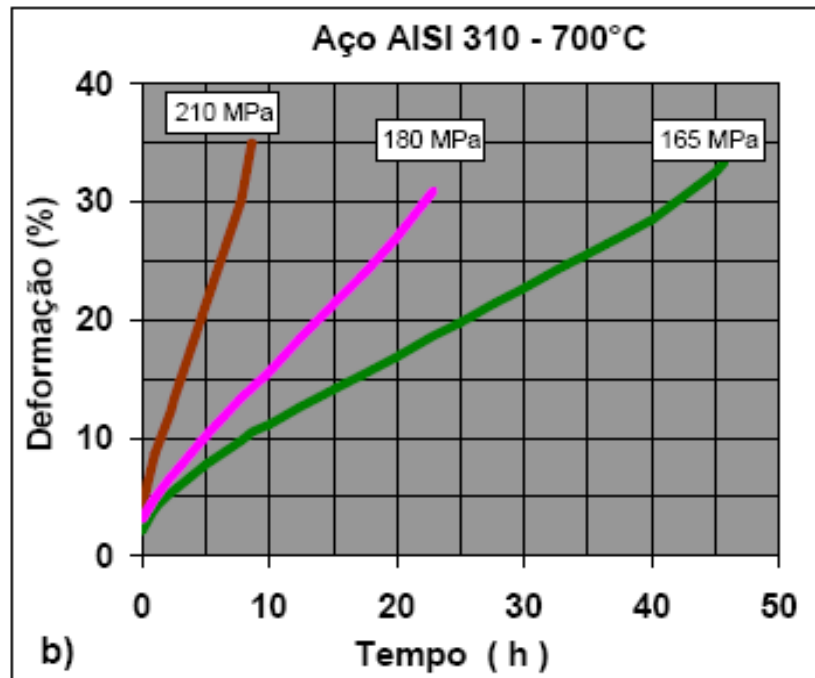


Figura 4.27 b) Gráfico de Deformação versus Tempo para o aço AISI 310 a 700°C para as tensões de: 165 MPa, 180 MPa e 210 MPa.

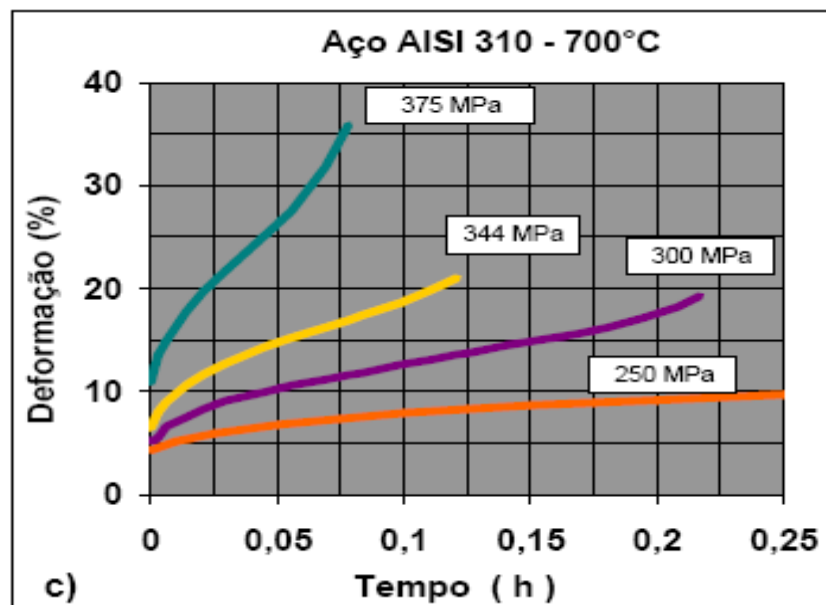


Figura 4.27 c) Gráfico de Deformação versus Tempo para o aço AISI 310 a 700°C para tensões: 250 MPa, 300 MPa, 344 MPa e 375 MPa.

Nota-se com as Figura 4.27 a, b e c que quanto maior a tensão, maior será o nível de deformação atingido durante o ensaio e menor o tempo necessário para a ocorrência da ruptura, exceções ocorrem para as tensões de 130 MPa e 165 MPa.

As Figuras 4.28 a, b e c retratam as análises do aço AISI 310 com relação ao critério de equivalência [9,42,43], plotados segundo os diagramas de resistência a fluência com o tempo de ruptura e os diagramas de Norton [27], Monkman-Grant [28] respectivamente, onde em todos os casos os dados apresentaram um comportamento satisfatório.

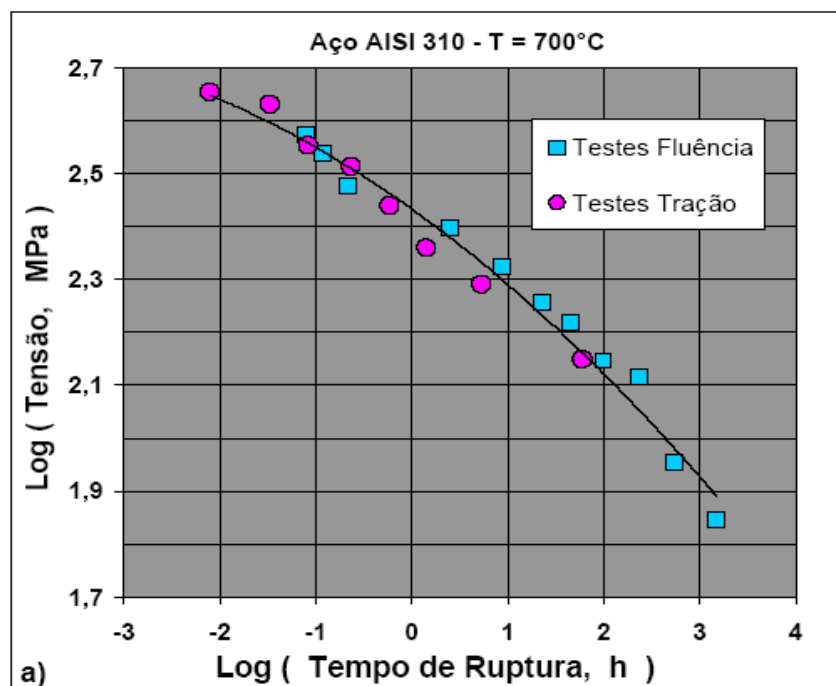


Figura 4.28 a) Análise dos dados do Aço AISI 310, segundo o resistência a fluência com o tempo de ruptura.

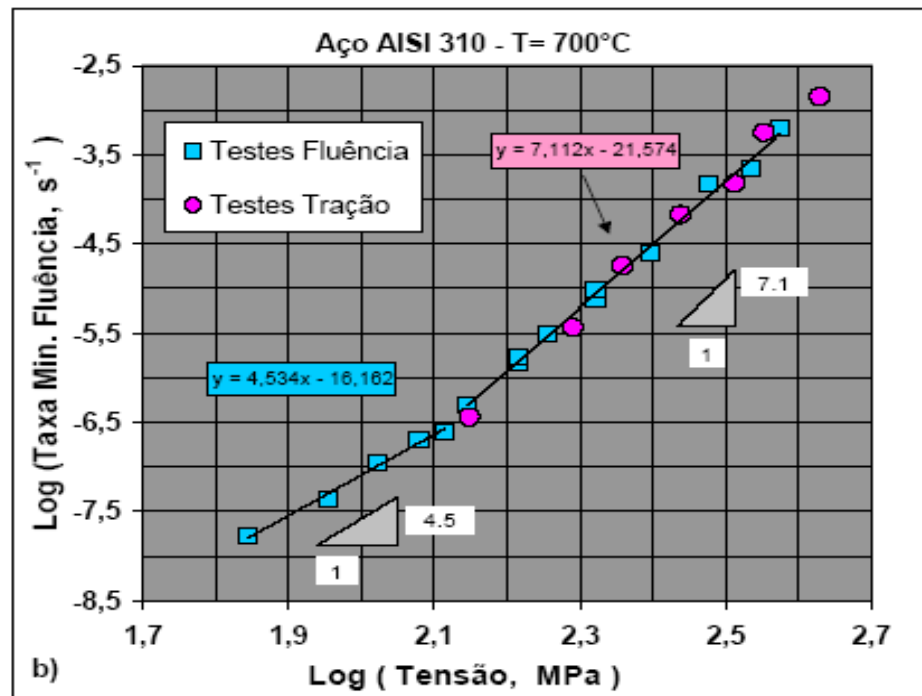


Figura 4.28 b) Análise dos dados do Aço AISI 310, segundo o diagrama de Norton [27].

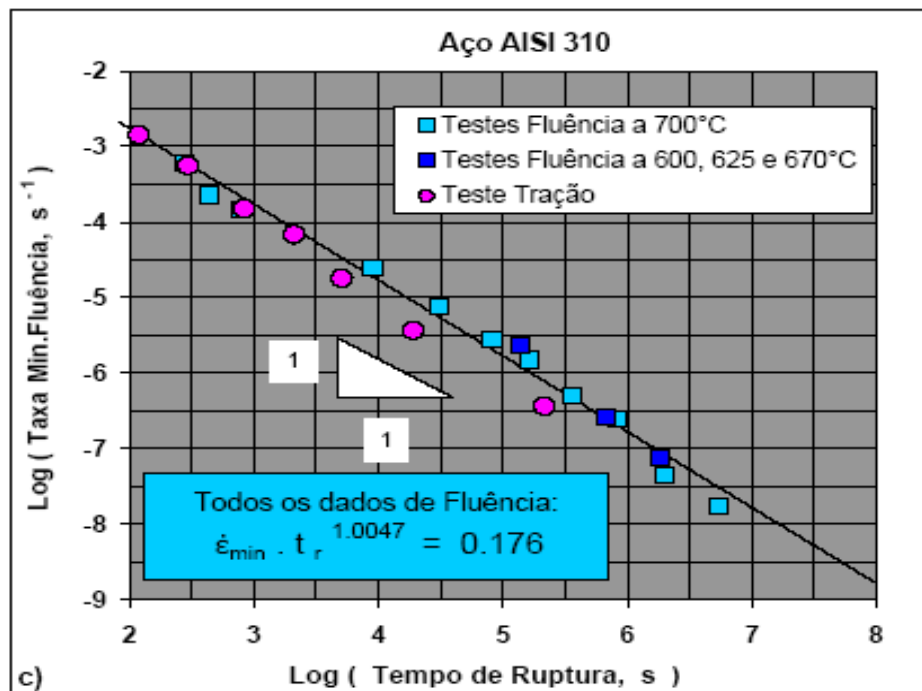


Figura 4.28 c) Análise dos dados do Aço AISI 310, segundo o diagrama de Monkman-Grant [28].

Com essas análises podemos observar o bom comportamento dos dados do aço AISI 310 quando submetidos ao critério de equivalência proposto por Bueno e Reis Sobrinho [9,42,43], o que reforça a possibilidade de validade do critério para diferentes materiais.

4.2.4 Confirmação de existência do fenômeno de fluência à temperatura ambiente no aço 2,25Cr-1Mo

Os próximos resultados visam comprovar a existência do fenômeno de fluência à temperatura ambiente, no aço 2,25Cr-1Mo, um aspecto que pode ser considerado totalmente inédito, uma vez que a literatura não apresenta referência sob a ótica do presente trabalho.

Os ensaios de fluência à temperatura ambiente apresentam certa dificuldade na sua realização, podendo se tornar muito críticos, uma vez que pequenas variações na tensão aplicada podem levar a tempos de ruptura ou muito curtos ou extremamente longos, tornando inviável a continuação do experimento.

As Figuras 4.29a; b; c; d; e e f apresentam algumas das curvas de fluência obtidas na temperatura ambiente, mencionando os valores referentes à taxa mínima de fluência, deformação final e tempo de ruptura.

Nestas figuras os ensaios de fluência apresentados comprovam a existência deste fenômeno, para diversas condições de carregamento, na temperatura ambiente conduzindo a tempos de rupturas que variam de minutos até ensaios com a necessidade de interrupção em razão do extenso tempo necessário para a sua finalização.

Nota-se que todas as curvas apresentaram ruptura e exibem os 3 estágios convencionais de fluência: primário, secundário e terciário. No caso da Figura 4.29f, por se tratar de leituras muito longas passaram a apresentar um ruído da ordem de $\pm 0,05\%$, ficando mais ou menos evidente a presença dos estágios primário e secundário.

A Figura 4.30 apresenta os dados de variação de Taxa Mínima de Fluência com a Tensão (diagrama de Norton) para todos os ensaios de

fluência realizados à temperatura ambiente no aço 2,25Cr-1Mo. No mesmo gráfico são plotados também os dados referentes a tração ambiente no aço, devidamente convertidos para a fluência segundo o critério estudado.

Tanto os dados de fluência como os de tração apresentados na Figura 4.30 mostram uma concordância satisfatória quando analisados com relação ao diagrama de Norton, apresentando, porém um valor de $n \approx 127$, que é um valor extremamente alto em relação àqueles que se obtém normalmente em altas temperaturas. A Figura 4.31 apresenta dados de fluência e tração na temperatura ambiente plotados na forma Log (Tensão) versus Log (Tempo de Ruptura), onde se verifica uma boa concordância entre os resultados. A Figura 4.32 mostra o comportamento com relação ao diagrama de Monkman-Grant, indicando também a existência de uma correlação razoavelmente satisfatória entre os pontos apresentados. Os dados de tração a quente, ficando apenas um pouco mais deslocados para cima, apresentam a mesma inclinação que os de fluência. A Figura 4.33 apresenta a Taxa Mínima de Fluência versus Tensão para todas as temperaturas estudadas, mostrando um panorama do comportamento do aço com relação à análise pelo critério de conversão de tração/fluência agora numa gama de condições bem mais amplas do que as estudadas por Reis Sobrinho [9]. Permitindo a comparação do critério de equivalência desta Figura com a Figura 2.17a, que contém somente os dados obtidos por Reis Sobrinho [9], numa gama de condições bem mais amplas, como era objetivo deste trabalho. A Figura 4.34 mostra os dados de tração e fluência na temperatura ambiente, plotados segundo o diagrama de Monkman-Grant e comparados com o restante dos dados na faixa de 500 a 700°C.

A compatibilidade entre os resultados nas duas modalidades de teste à temperatura ambiente e em altas temperaturas é bem mais notória. É notável também a maior quantidade de dados submetidos a esse tipo de análise, em relação ao conjunto anterior obtido por Reis Sobrinho [9] mostrado na Figura 2.17c.

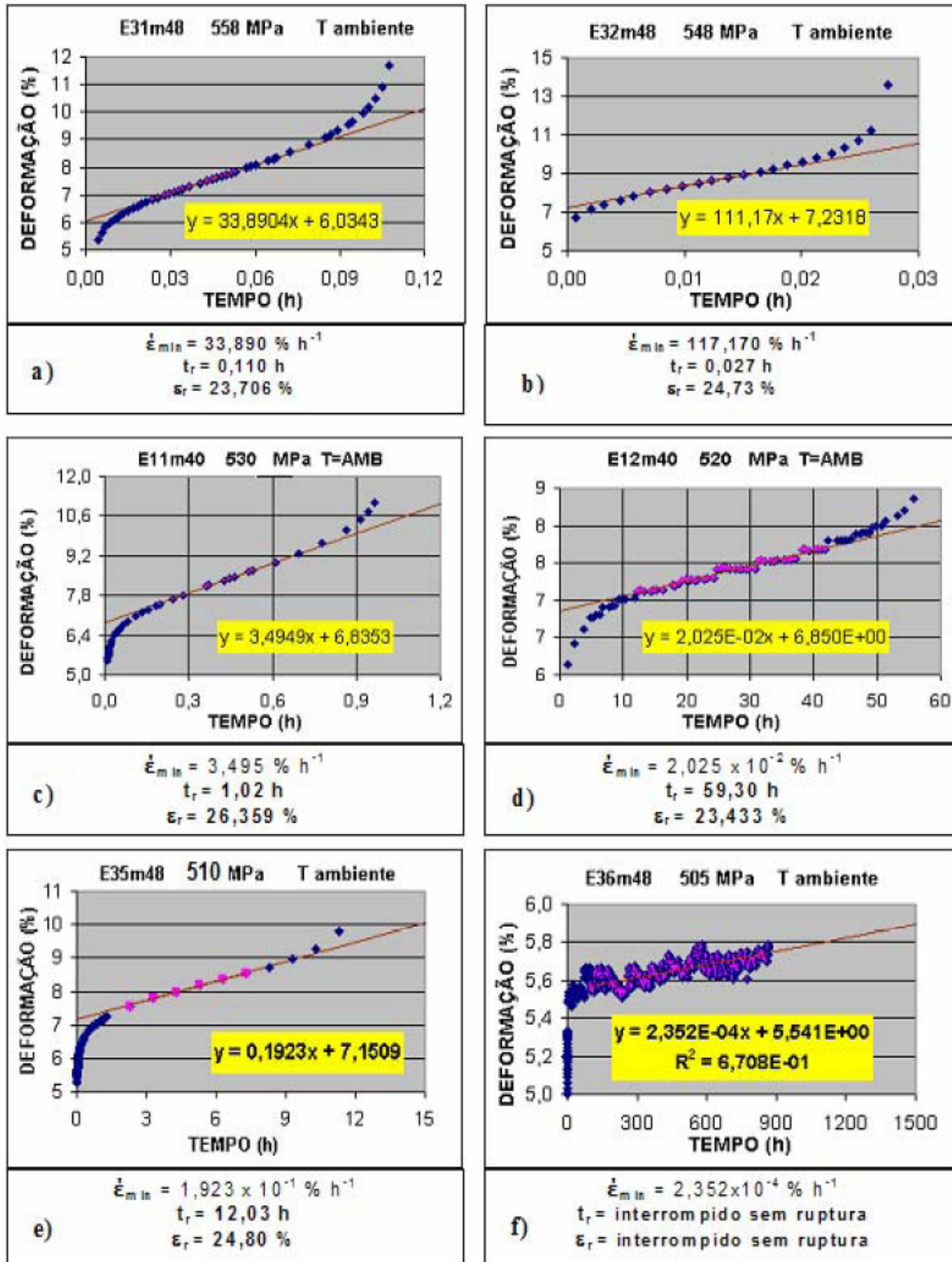


Figura 4.29 Exemplo de curvas de fluência do aço 2,25Cr-1Mo ensaiado à temperatura ambiente com: a) 558 MPa; b) 548 MPa; c) 530 MPa; d) 520 MPa; e) 510 MPa e f) 505 MPa.

As figuras seguintes apresentam o comportamento do aço 2,25Cr-1Mo submetido a ensaios de fluência à temperatura ambiente sob diversos tipos de parametrização.

A Figura 4.30 mostra o comportamento dos dados de fluência plotados na em Log (Taxa Mínima de Fluência) x Log (Tensão).

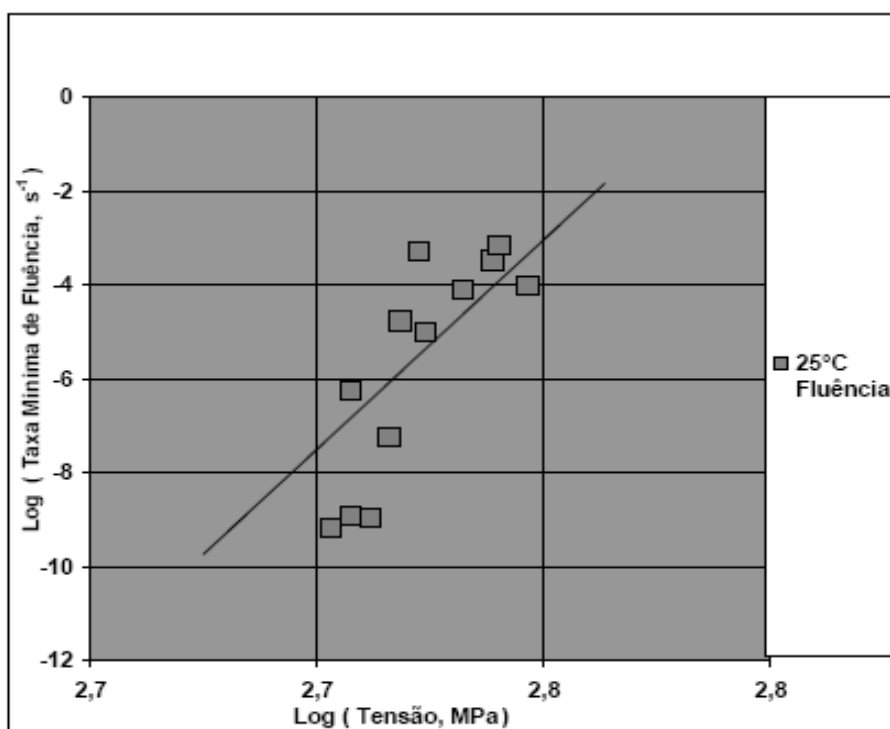


Figura 4.30 Dados de fluência na temperatura ambiente, segundo o diagrama de Norton (27)

A Figura 4.31 mostra o comportamento dos dados de Tensão versus tempo de Ruptura para os dados de fluência a temperatura ambiente.

A Figura 4.32 apresenta os dados de fluência à temperatura ambiente na forma de Log (Taxa Mínima de Fluência) X Log (Tempo de Ruptura), segundo o diagrama de Monkman-Grant.

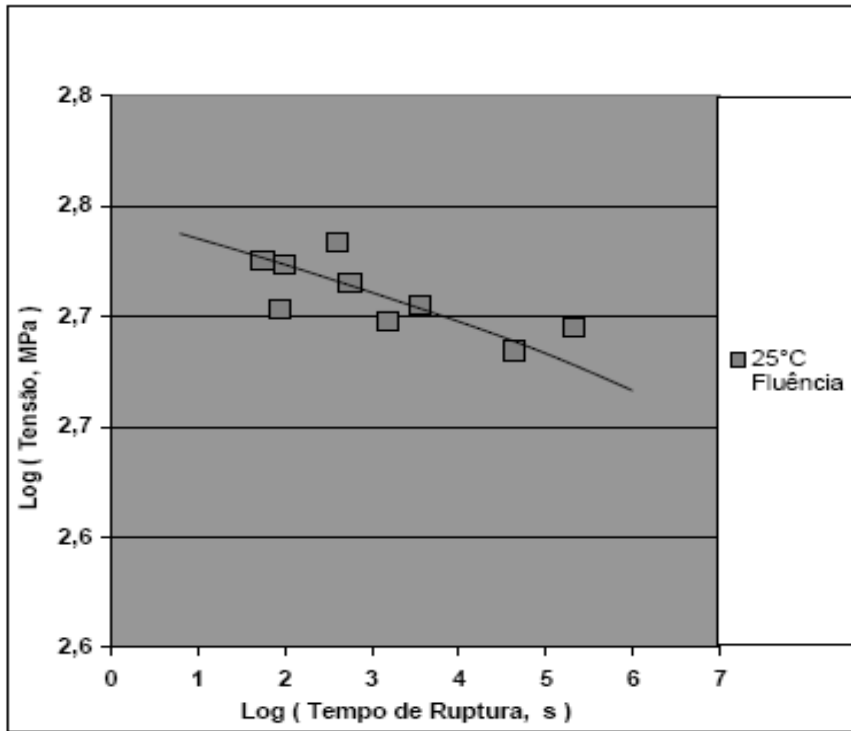


Figura 4.31 Variação da Tensão versus tempo de Ruptura para resultados de fluência na temperatura ambiente.

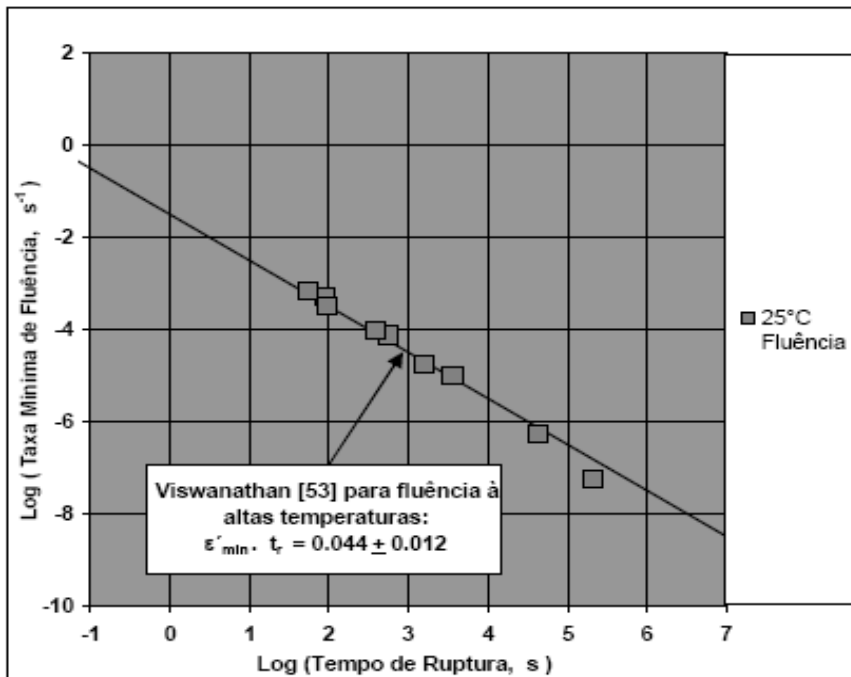


Figura 4.32 Dados de fluência na temperatura ambiente, segundo o diagrama de Monkman-Grant (28).

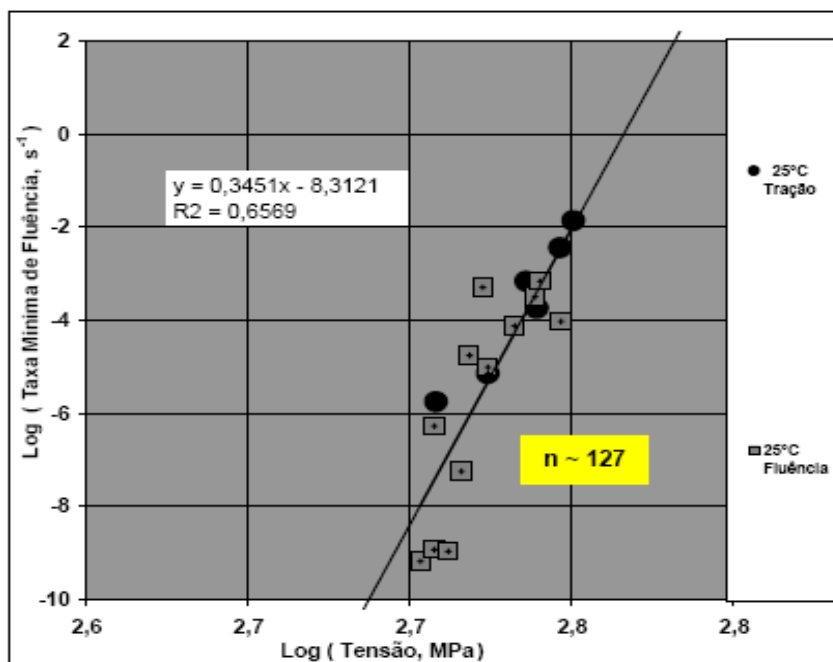


Figura 4.33 Dados de fluência e tração na temperatura ambiente, segundo o diagrama de Norton (27).

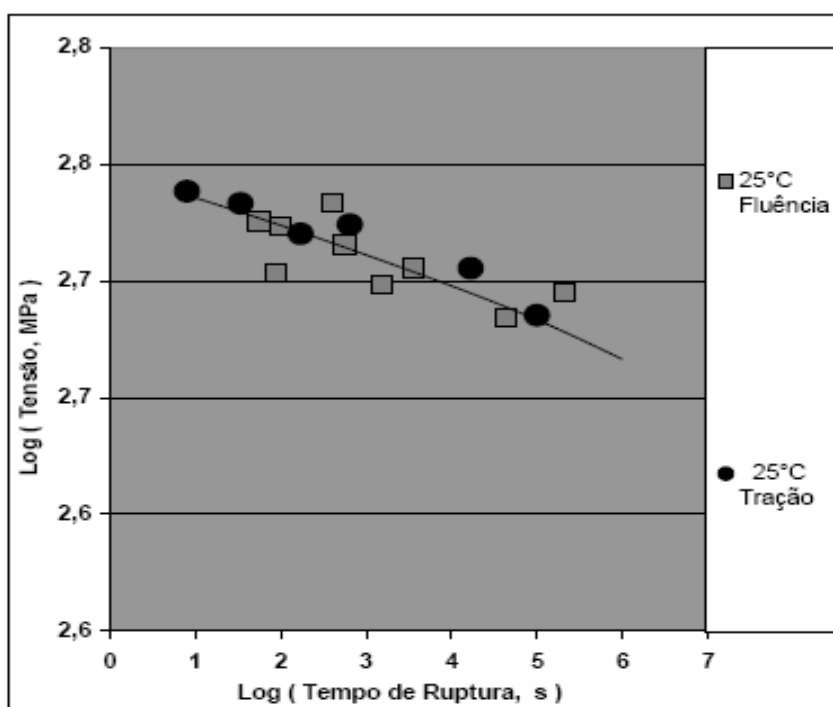


Figura 4.34 Variação da Tensão versus tempo de Ruptura para resultados de fluência e tração na temperatura ambiente.

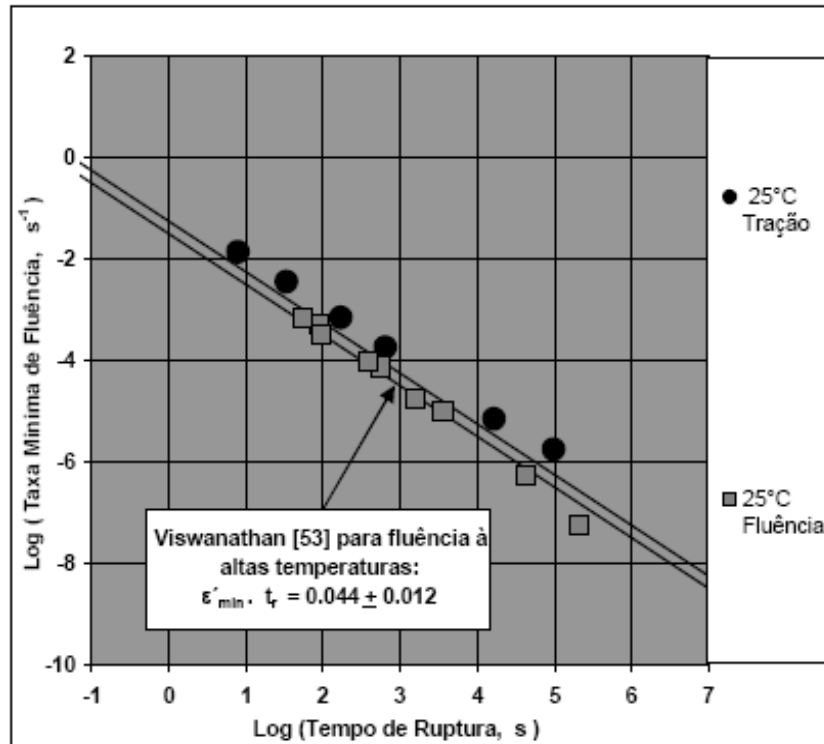


Figura 4.35 Dados de fluência e tração na temperatura ambiente, segundo o diagrama de Monkman-Grant (28).

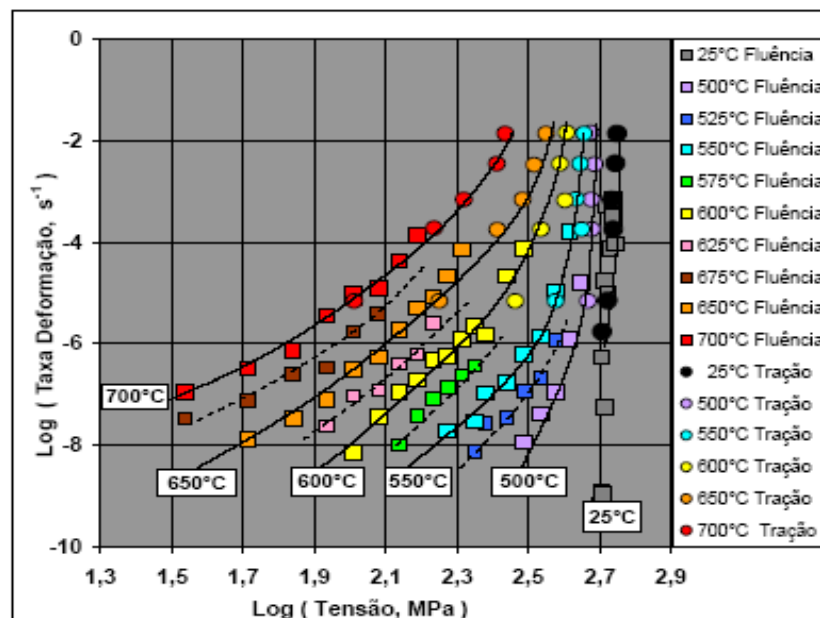


Figura 4.36 Dados de fluência e tração na temperatura ambiente, comparado com o restante dos dados na faixa de 500°C a 700°C, segundo o diagrama de Norton (27).

A Figura 4.37 mostra que os maiores valores de m' ocorrem nas temperaturas mais altas, para menores níveis de tensão, o que faz sentido. Nas temperaturas mais baixas a tendência é obter-se valores cada vez menores de m' . Nesse caso, valores mais altos de m' só poderão ocorrer com o abaixamento da tensão, levando a ensaios de fluência ou tração á quente cada vez mais longos.

A curva média que passa por todos os dados parece indicar que o mesmo fato poderia ocorrer também com os dados na temperatura ambiente, ou seja uma elevação dos valores de m' , com abaixamento gradativo da tensão, além de 500MPa, porém certamente com o uso de ensaios extremamente longos, como indica por exemplo a Figura 4.34.

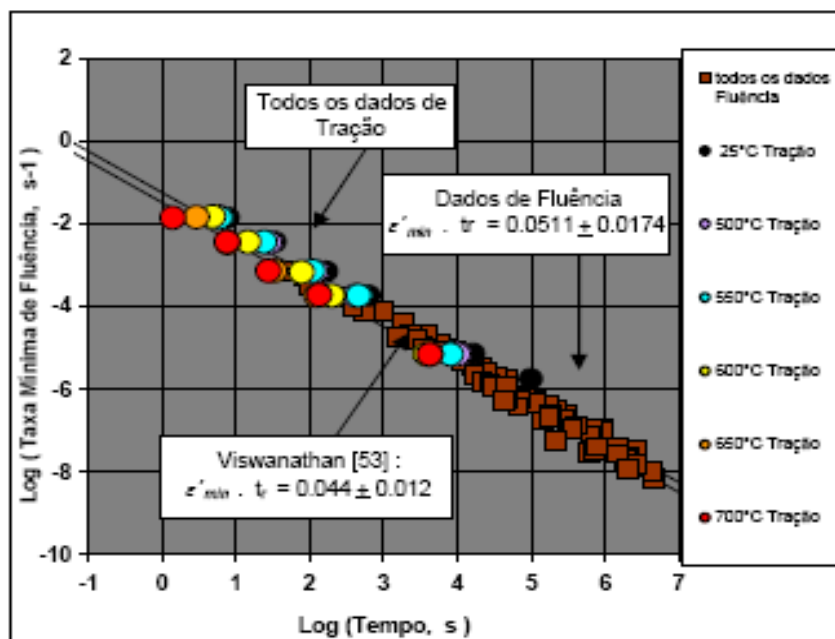


Figura 4.37 Dados de fluência e tração na temperatura ambiente, comparado com o restante dos dados na faixa de 500°C a 700°C, segundo o diagrama de Monkman-Grant (28).

A Figura 4.38 mostra o comportamento do conjunto de dados de tração e fluência com relação ao diagrama Log(Tensão) versus Log(Tempo de Ruptura), confirmando o bom desempenho destes dados retratados da mesma

forma na Figura 2.17, com o acréscimo de novos dados, dentre eles a fluência à temperatura ambiente.

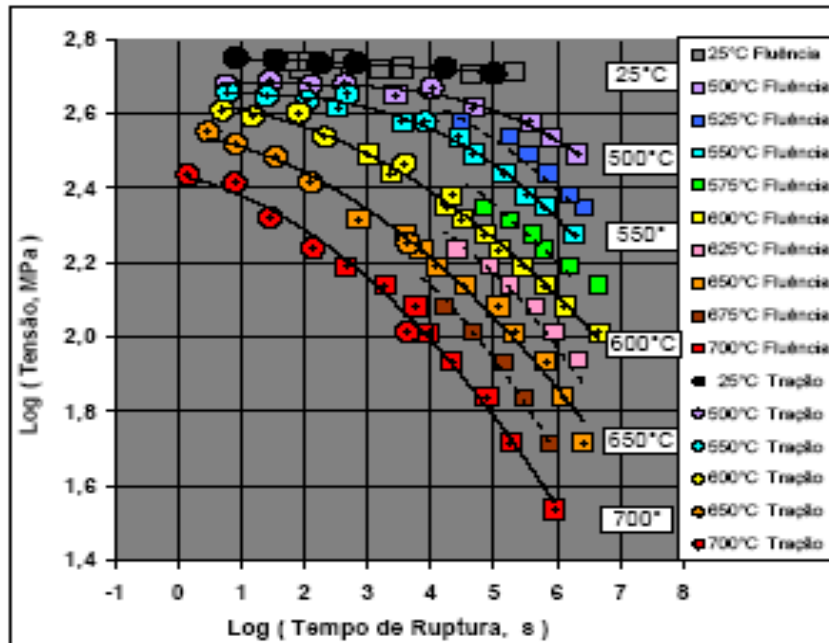


Figura 4.38 Dados de fluência e tração na temperatura ambiente, comparados com o restante dos dados na faixa de 500°C a 700°C, segundo o diagrama de variação de Resistência a Fluência com o Tempo de Ruptura.

A Figura 4.39 mostra o comportamento da variação do Expoente de Norton (n) em função da Tensão para os dados de tração e fluência obtidos a 25°C e na faixa de 500 a 700°C.

Os valores do Expoente de Norton foram obtidos pelo cálculo da inclinação (tangente $\partial \text{Log } \dot{\epsilon} / \partial \sigma$) em diversos pontos ao longo de cada curva do diagrama de Norton (Figura 4.33) a certa temperatura envolvendo tanto os dados de fluência como os de tração. Nota-se que a faixa de valores de n entre 1 e 10 é normalmente obtida, nos níveis de temperatura mais altos, em tensões moderadas e baixas. A partir de certos níveis de tensão em cada temperatura, a medida que a tensão aumenta, os valores de n tendem a

crescer rapidamente,. Esse aumento vertiginoso de n é mais notado nas temperaturas mais baixas.

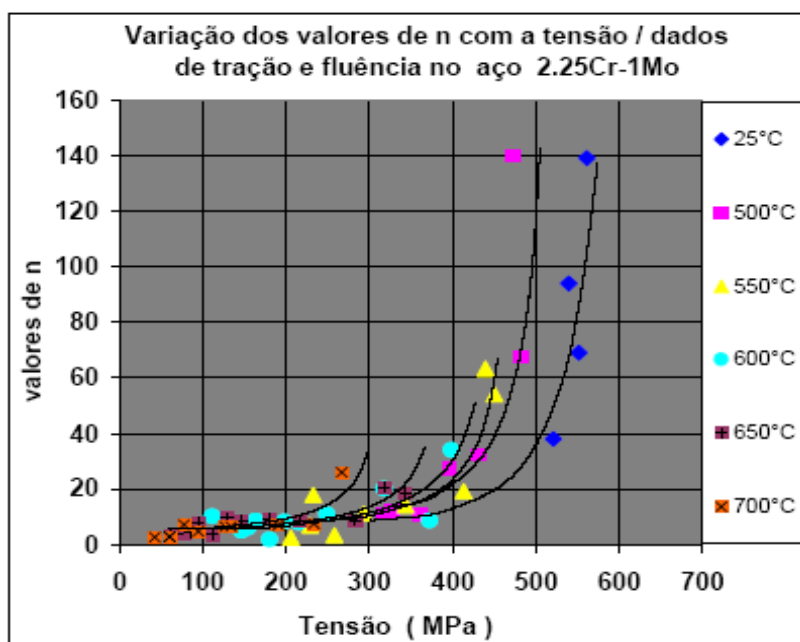


Figura 4.39 Variação de n (Expoente de Norton) com a Tensão para os dados de fluência e tração.

A Figura 4.40 mostra a variação do Coeficiente de Sensibilidade da Tensão com a Taxa de Deformação (m') em função da Tensão para os ensaios de tração e fluência, considerando-se $m' = 1/n$ no caso de fluência. Como os valores de n foram determinados anteriormente, obtemos então os valores de m' .

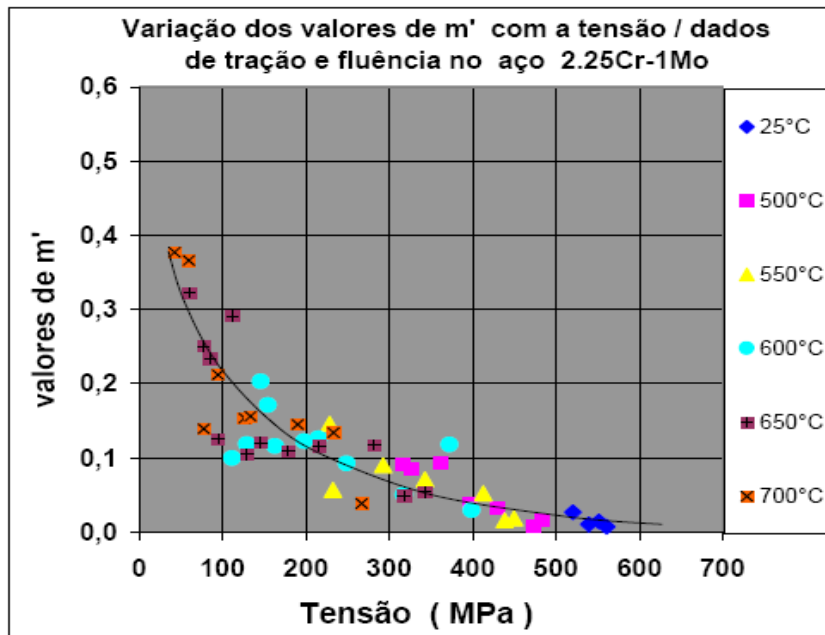


Figura 4.40 Variação de m' com a Tensão para os dados de fluência e tração.

O conjunto de figuras apresentadas na seção 4.2.4 mostra que o comportamento dos dados de fluência e tração a temperatura ambiente, apresenta desempenho compatível entre si quando analisados através do critério de equivalência.

Esses dados à temperatura ambiente também apresentam boa concordância com os dados do mesmo tipo obtidos nas outras temperaturas (entre 500 e 700°C).

5 DISCUSSÃO

Este trabalho se concentrou inicialmente nos ensaios de tração para completar os dados obtidos por Reis Sobrinho [9] no aço 2,25Cr-1Mo como mostra Tabela 3.2. Estes ensaios foram conduzidos nas seguintes condições: $V_T = 0,01; 0,25; 1; 5; 20$ e 200 mm/min, para as temperaturas ambiente $100^\circ\text{C}; 200^\circ\text{C}; 300^\circ\text{C}; 400^\circ\text{C}$ e 450°C . Na velocidade de tração de 200 mm/min, além destas temperaturas, o material também foi ensaiado a $500^\circ\text{C}; 550^\circ\text{C}; 600^\circ\text{C}; 650^\circ\text{C}$ e 700°C .

Estes ensaios mostram a existência do Efeito de Envelhecimento Dinâmico por Deformação que pode ser notado pela inversão na posição natural das curvas Tensão versus Deformação. Fato este presenciado nas condições: $V_T = 0,01$ mm/min a 300° e 400°C ; $V_T = 0,25$ mm/min a $200^\circ\text{C}, 300^\circ\text{C}$ e 400°C ; $V_T=1$ mm/min a 100 e 400°C ; $V_T=5$ mm/min a 300 e 400°C ; $V_T = 20$ mm/min a 400 e 450°C e $V_T=200$ mm/min a 400 e 450°C e se mostrando mais atuantes nas temperaturas de 300°C e 400°C .

Outro fenômeno notado nestes ensaios é o Portevin-Le-Chatelier, observado pela presença dos serrilhados nas curvas Tensão x Deformação, para valores de $V_T = 0,25$ mm/min a 300°C ; $V_T = 5$ e 20 mm/min para todas as temperaturas.

Com relação aos dados plotados na forma Limite de Escoamento x Temperatura, é notória a ampla inversão entre as curvas para as diversas temperaturas, fato este que se intensifica na faixa de 200 a 500°C , porém da temperatura ambiente a 100°C e na faixa de 550°C a 700°C as curvas, mantendo o comportamento padrão, mostram uma tendência de se alinhar.

As discrepâncias retratadas acima mostram o efeito nas curvas causado pelo Endurecimento Dinâmico por Deformação e Efeito Portevin-Le-Chatelier, efeito mais acentuado nas temperaturas mencionadas, conforme retratado na Figura 4.2a.

O mesmo ocorre na Figura 4.2b, onde pode se observar nas curvas Limite de Resistência X Temperatura, as mesmas variações nestas faixas de temperatura, reforçando de forma mais intensa a atuação destes fenômenos.

A análise das Figuras 4.3a e 4.3b retratam as variações comportamentais já mostradas e discutidas anteriormente nas figuras em termos da variação do alongamento e redução de área.

Já nas análises seguintes são avaliados os dados de comportamento com relação às Tensões de escoamento e Limites de Resistência versus Taxa de Deformação, conforme mostram as Figuras 4.4a e 4.4b. Na análise destes dados vêm-se alterações no comportamento esperado, como visualizado na faixa de temperatura de 300°C a 450°C, através de inversões das posições das curvas. Alguns valores também destoam do esperado como mostra, por exemplo, a Figura 4.4a para a curva a $V_T = 1$ mm/min na temperatura 450°C.

As Figuras 4.5a e 4.5b apresentam dados na forma de Alongamento Final e Redução de área com Taxa de Deformação Nominal, com o mesmo comportamento retratado nas figuras anteriores, o que vem reforçar a atuação mais intensa dos fenômenos de Endurecimento Dinâmico por Deformação e Efeito Portevin-Le chatelier.

A análise do comportamento do aço 2,25Cr-1Mo na fase seguinte é ilustrada nas Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9, para o material submetido a ensaios de tração com extensometria, na faixa de temperatura de 25°C a 700°C.

Na análise dos dados de Tensão Nominal x Deformação Nominal da Figura 4.6, pode-se observar para temperaturas superiores a 400°C, que as curvas apresentam valores mais elevados de Tensão e Deformação, chegando mesmo a se sobrepor às outras curvas nas temperaturas inferiores, como por exemplo para a curva de 450°C que apresenta valores mais elevados do que a de 400°C.

A análise da disposição dos dados apresentados na Figuras 4.7a e 4.7b, (Limite de Escoamento e Limite de Resistência x Temperatura), também apresentam valores mais elevados a partir de 400°C para os parâmetros

analisados, vindo a confirmar o comportamento dos dados ilustrados pela Figura 4.6.

Nas Figuras 4.8 a e b, que trazem o comportamento do Alongamento na Ruptura e da Redução de Área x Temperatura, pode-se visualizar um comportamento dos dados para as temperaturas na faixa de 25°C a 400°C e outro de 450°C a 700°C, retratando como nas figuras anteriores inversões nos comportamentos dos dados para as curvas acima de 400°C.

Quanto ao Módulo Elástico apresentado na Figura 4.9 temos um comportamento mais uniforme dos dados, apresentando um afastamento do Módulo na temperatura em 400°C.

O estudo dos dados obtidos com os ensaios de tração com extensometria revela que acima de 400°C, ocorre uma maior influência do Envelhecimento Dinâmico por Deformação e do Efeito Portevin-Le-Chatelier, acarretando mudanças no comportamento do material quando ensaiado nestas condições, através de maiores valores de Limite de Escoamento, Limite de Resistência, Alongamento na Ruptura e Redução de Área.

O presente estudo prossegue com a análise do comportamento dos dados com relação ao Expoente de Encruamento (n') e com o Coeficiente de Encruamento (K'), apresentados nas Figuras 4,10 e 4.11, onde pode se notar que para os valores de n' existem comportamentos distintos dos dados, onde até 400°C as curvas apresentam valores negativos, este fato é um indicativo da influência exercida pelos fenômenos de EDD e Portevin-Le-Chatelier) para essas condições de ensaio.

Para as temperaturas de 450 e 500°C os dados mostram um comportamento intermediário com a inclinação da curva negativa para as velocidades mais altas ($V_T = 5, 20$ e 200 mm/min) e positiva nas mais baixas ($V_T = 0,01, 0,25$ e $1,0$ mm/min), ocorre constantemente porque os fenômenos de EDD e do Efeito Portevin-Le-Chatelier ocorrem na faixa de 200°C a 500°C . Acima de 550°C estes efeitos cessam, voltando os dados a apresentar, inclinação positiva.

Para o conjunto de Figuras 4.11 que apresentam os valores de K' o comportamento dos dados é o mesmo apresentado para os valores de n' , ou seja, até 400°C K' se torna negativo e a partir de 450°C os dados passam a apresentar valores positivos, a única exceção fica com os dados para a temperatura ambiente.

A próxima análise realizada buscou avaliar o comportamento de n' e de K' quando plotados com a temperatura, o que pode ser visto nas Figuras 4.12 e 4.13.

A análise dos dados de n' mostra que da temperatura ambiente até 400°C os valores se mantêm numa faixa que vai de 0,10 a 0,15, além de ocorrer uma grande inversão entre as curvas e a partir de 450°C as curvas mostram um maior alinhamento e n' atingem valores menores .

A mesma tendência é observada para os valores de K' , que se mantêm na faixa de 700 a 900 MPa para as temperaturas do ambiente até 400°C , também com muitas inversões nas curvas, o que é superado com o aumento da temperatura com o alinhamento da curvas e com o decréscimo dos valores de K' .

Com a apresentação do conjunto de Figuras discutido acima podemos dizer que o comportamento do Coeficiente de Resistência segue o mesmo padrão apresentado pelo Expoente de Encruamento tendo seus valores afetados de forma mais intensa em razão do EDD e do EPLC para as mesmas condições experimentais explicitadas acima.

Outra parte interessante do estudo dos dados de tração a quente se refere às Figuras 4.14 que apresentam os valores do Expoente de Sensibilidade do Limite de Escoamento à Taxa de Deformação com valores negativos para as temperaturas de 300, 400, 500 e 550°C . Para o Expoente de Sensibilidade do Limite de Resistência à Taxa de Deformação apresentados na Figura 4.15, os valores negativos se apresentam para as temperaturas de 100, 200, 300 e 400°C .

Este fator pode ser visualizado com bastante clareza mediante a introdução da Figura 4.16 a e b, que traz o Expoente de Sensibilidade do Limite de Escoamento e o Limite de Resistência com a Temperatura. Em ambos os casos o efeito deve ser devido à ocorrência do EDD e apresenta uma boa concordância com as análises realizadas nas Figuras 4.10 e 4.11.

A próxima fase do trabalho tem o intuito de verificar a validade do critério de equivalência entre os fenômenos de fluência e tração.

Este estudo tem início com a introdução da Figura 4.18 que retrata o comportamento de todos os dados de fluência e tração sob a forma de Taxa Mínima de Fluência com a Tensão para os dados de Fluência e tração convertidos segundo o critério.

A Figura 4.19 apresenta os dados plotados na forma de Taxa Mínima de Fluência pelo Tempo de Ruptura, já a Figura 4.20 estuda os dados na forma de Taxa Mínima de Fluência pelo inverso da Temperatura (K) e finalizando este tópico os dados são tratados na forma de Tensão pelo Tempo de Ruptura.

Em todas estas análises os dados de fluência e tração mantêm uma boa correlação, ressaltando que os dados para temperatura de 25°C são os que apresentam uma maior dificuldade de enquadramento no critério. Outro ponto a ser observado neste estudo é a aproximação entre as curvas de 500°C e a de 25°C, o que gera indícios de realização de ensaios de fluência nestas temperaturas intermediárias se tornaria mais trabalhosa e crítica, visto que a variação da tensão entre os ensaios seria pequena, o que dificultaria a realização do ensaio.

Visando avaliar o desempenho do critério de equivalência foram estudados dados provenientes de outros autores, dentre eles Klueh [50,51] e Klueh e Oakes [48] que realizaram um trabalho amplo para o aço 2,25Cr-1Mo com quatros diferentes tipos de tratamento AN-1, AN-2, IA e Normalizado e Revenido.

Buscando avaliar a validade do critério para os dados obtidos por Klueh [50,51] e Klueh e Oakes [48], o mesmo foi testado com vários tipos de diagramas, este estudo tem início com o aço 2,25Cr-1Mo no estado AN-1 conforme retratado na Figura 4.22 a,b,c utilizando os diagramas de Norton, Monkman-Grant e o de queda da Resistência a Fluência com o Tempo de Ruptura.

A mesma seqüência de análises é realizada para o aço no estado AN-2 como apresentado na Figura 4.23 a,b e c , já na Figura 4.24 a,b e c temos as análises para o aço no estado IA e finalizando temos na Figura 4.25 a, b e c o estudo realizado para o aço no estado normalizado e revenido.

A análise deste conjunto de dados indica que o critério de equivalência testado com relação ao critério de Norton para os dados de Klueh [50,51] e Klueh e Oakes [48], mostra um bom desempenho dos dados, porém em todos os casos ocorrem afastamentos dos dados para a temperatura de 510°C e 566°C, mostrando um melhor desempenho dos dados no estado.

O estudo dos dados utilizando o diagrama de Monkman-Grant apresenta um comportamento satisfatório, porém os resultados que mostram melhor desempenho do aço no estado AN-2 e normalizado e revenido.

Finalizando com o estudo do diagrama de queda da Resistência a Fluência com o Tempo de Ruptura onde existe um desvio mais acentuado dos dados para o aço no estado normalizado e revenido na temperatura de 454°C, porém este fato não anula o bom comportamento dos dados para o material, em todas as condições para este critério.

É possível observar com esta parte da análise que os desvios existentes tiveram maior intensidade nas temperaturas de 454°C, 510°C e 566°C, mostrando que para estas condições de trabalho também ocorreram os efeitos de Envelhecimento Dinâmico por Deformação e do Efeito Portevin-Le-Chatelier (11).

Para completar o estudo e colocar em prova a validade do critério para outros materiais, a mesma análise foi realizada para o aço Inoxidável Austenítico AISI 310, também com bons resultados.

Na Figura 4.26 temos inversões nas curvas de Tensão versus Deformação para $VT = 0,5$ e 5 mm/min, mostrando neste caso indícios de Envelhecimento Dinâmico por Deformação e do Efeito Portevin-Le-Chatelier. Para este material apresentadas Nas Figura 4.27^a e 4.27^b as análises de fluência para as tensões de 130 e 180 MPa apresentaram valores menores do que o esperado de deformação.

A análise dos dados obtidos para o aço AISI 310 com relação ao critério de equivalência utilizando os diagramas Queda de Resistência a Fluência com o Tempo de Ruptura, Norton e Monkman-Grant, mostram um desempenho muito bom dos dados. Nota-se uma mudança da inclinação da reta para os dados de Norton, nas tensões mais baixas, indicando n estas condições de trabalho a ocorrência dos fenômenos de Envelhecimento Dinâmico por Deformação e Efeito Portevin-Le-Chatelier.

Outro ponto importante foi a realização de ensaios de fluência a temperatura ambiente apresentados na Figura 4.29, que podem ser considerados inéditos, dado à inexistência de informações sobre esse fenômeno na literatura para os aços em geral. Nestas condições pequenas variações na tensão aplicada podem ocasionar a ruptura imediata do ensaio ou prolongar sua execução até um tempo inviável para o monitoramento do mesmo. A série de ensaios preliminares apresentados neste trabalho comprovou a existência do fenômeno de fluência à temperatura ambiente, indicando, porém a necessidade de que novos ensaios desse tipo sejam realizados para dar uma maior profundidade ao estudo.

A Figura 4.30 inicialmente utilizando-se o diagrama de Norton, mostra um estudo destes dados com relação ao critério de equivalência realizado para uma análise mais ampla do fenômeno de fluência na temperatura ambiente, onde se observa na temperatura ambiente que, apesar de algum

espalhamento dos dados, ocorre uma linearidade entre os dados de fluência e tração. Um fato importante porém, o que não é um fato comum é o elevado valor de n' para o fenômeno de fluência, merecendo maiores estudos posteriores.

A Figura 4.31 mostra o comportamento dos dados seguindo o diagrama de queda de Resistência a Fluência com Tempo de Ruptura, apresentando boa concordância, o mesmo ocorre na Figura 4.32 que apresenta a análise dos dados do diagrama de Monkman-Grant.

As Figuras 4.33, 4.34, 4.35 introduzem os dados de fluência à temperatura ambiente juntamente com o conjunto de dados de tração e fluência obtidos para o aço 2,25Cr-1Mo mostrando um comportamento aceitável dos dados de fluência nos diagramas de Norton, Monkman-Grant e variação da Queda da Resistência a Fluência com Tempo de Ruptura.

A Figura 4.36 mostra a análise do Expoente de Norton, com um comportamento muito bom para os dados inclusive a temperatura ambiente, o mesmo ocorrendo com os valores de m' .

Estas figuras dão um grande indício da real ocorrência do fenômeno de fluência a temperatura ambiente.

6 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho propiciou uma compreensão mais ampla dos fenômenos que atuam no aço 2,25Cr-1Mo quando submetido aos ensaios de tração a quente e fluência, além de ampliar o estudo do critério de Equivalência também com dados de outros autores e com um material diferente.

Os fenômenos de Envelhecimento Dinâmico por Deformação e do Efeito Portevin-Le-Chatelier podem ser visualizados nos ensaios em razão das modificações nas posições esperadas das curvas e também pelo serrilhamento das mesmas.

Estes efeitos podem causar modificações no Limite de Escoamento e no Limite de Resistência dos materiais, acarretando alterações nas propriedades mecânicas dos aços que são mais pronunciados em determinadas temperaturas e velocidades de Tração, como foi discutido e ilustrado principalmente para as temperaturas mais baixas (da ambiente até 400°C).

Estes efeitos (EDD e EPLC), também podem ser notados nas análises realizadas para o aço 2,25Cr-1Mo visando o estudo do Expoente de Encruamento e do Coeficiente de Resistência, que como resultado destes efeitos apresenta para as temperaturas inferiores valores negativos (100 a 400°C), acima desta temperatura as inclinações das retas passam a ser positivas novamente, o que indica que nestas temperaturas os efeitos causados pelo EDD e do EPLC não atuam ou são pouco sentidos.

As análises do Expoente de Sensibilidade da Tensão de Escoamento à Taxa de Deformação e do Expoente de Sensibilidade do Limite de Resistências à Taxa de Deformação, também vêm confirmar que os efeitos do EDD e do EPLC são amenizados ou mesmo nulos para as temperaturas superiores a 400°C.

Visando comprovar a validade do critério de Equivalência para o aço 2,25Cr-1Mo, os dados submetidos às conversões referentes ao critério também foram plotados na forma dos diagramas de Norton, Monkman-Grant e

o da Variação da Resistência fluência com o Tempo de Ruptura, em todos os casos apesar de pequenas dispersões em alguns pontos os dados se comportam muito bem, quando aplicados nesses diagramas.

Um fato que merece ser destacado é a aproximação que ocorre das curvas de 500 e 25°C, indicando a necessidade de uma tensão elevada para que se obtenham os dados de tração ao ambiente.

Prosseguindo o estudo foram testados nas mesmas condições citadas acima os dados obtidos por Klueh [50,51] e Klueh e Oakes [48], os dados gerados por eles confirmaram o que vinha acontecendo até então com os demais dados, apresentando um comportamento satisfatório com relação ao critério de equivalência (9, 42, 43).

Outro ponto ilustrado neste trabalho mostra as primeiras conclusões a respeito dos ensaios de fluência à temperatura ambiente, que mesmo com dificuldades para a sua realização em razão da sensibilidade experimental, apresentaram resultados preliminares que mostram à existência o fenômeno de fluência a temperatura ambiente.

A análise dos dados de fluência á temperatura ambiente, juntamente com os dados de tração nas mesmas condições, submetidos ao critério de Equivalência apresentaram uma concordância experimental dando indícios de que realmente é possível a realização de ensaios de fluência nessas condições mesmo com as devidas dificuldades experimentais.

Visto todos os pontos discutidos neste capítulo o trabalho cumpriu o que foi proposto inicialmente.

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para gerar informações mais confiáveis ainda com relação ao critério de Equivalência proposto por Bueno e Reis Sobrinho [], as mesmas análises poderiam ser realizadas em outros materiais.

Outro ponto a ser explorado consiste na ampliação do estudo de fluência a temperatura ambiente, tanto no aço 2,25Cr-1Mo como também para outros materiais, buscando obter uma avaliação mais detalhada deste fenômeno.

1. Apesar das dificuldades, submeter o aço 2,25Cr-1Mo a velocidades de tração bem baixas, partir de 0,001 mm/min, utilizando os mesmos tipos de corpos de prova empregados neste trabalho e verificar se estes dados equivalem a dados de fluência de 30 até 1000 horas de duração.
2. Estuda mais detalhado do fenômeno de fluência e tração envolvendo ensaios de longa duração à temperatura ambiente no aço 2,25Cr-1Mo, visando determinar os mecanismos de deformação responsáveis pelo processo.
3. Realização de um estudo espontâneo entre tração a quente e fluência para outros materiais incluindo, materiais puros como por exemplo: alumínio, cobre, níquel, chumbo, entre outros, ligas não ferrosas : latão, bronze, ligas de alumínio, etc, e materiais metálicos de alta resistência como : aços inoxidáveis, aços refratários, superligas, etc.
4. Estudo do fenômeno de fluência à temperatura ambiente e sua equivalência com tração à temperatura ambiente para outros sistemas metálicos, como metais puros, ligas não ferrosas e ligas de alta resistência como mencionado anteriormente.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SMITH, V.H. Supplemental report on the elevated-temperature properties of Chromium-Molybdenum Steels. **ASTM**, Philadelphia, USA, p. 8-11, 1971.
- [2] **ASTM A-387 / A387 M 06a**, A Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Alloy Steels, Chromium - Molybdenum.
- [3] CHIAVERINI, V. **Aços-Carbono e a Aços-Liga**. Associação Brasileira de Metais, ABM 3ª.ed., São Paulo (SP) , p. 1668-189, 1971.
- [4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM E-21** – Standard Practice For Elevated Temperature Tension Tests Of Metallic Materials, p. 190–196, 1990.
- [5] DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**, Ed. Guanabara Dois, 2ªEd., Rio de Janeiro, 1981.
- [6] GUY, A.G. **Ciência dos Materiais**. Livros Técnicos e Científicos, EDUSP, São Paulo, 1980.
- [7] CALLISTER, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais** – Uma Introdução, LTC, 5ª.Ed., Rio de Janeiro, 2002.
- [8] BUENO, L.O.; MARINO, L.; REIS SOBRINHO, F.J. Comportamento de tração a quente do aço 2,25Cr-1Mo na faixa de 500 °C a 700 °C. Parte 1: Variação da resistência e ductilidade em diferentes velocidades de tração. **Anais...7ª COTEQ**, Florianópolis (SC), art. N° COTEQ 114-03, p. 1-9, 2003.

- [9] REIS SOBRINHO, F.J.; MARINO, L.; BUENO, L.O. Comportamento de tração a quente do aço 2,25Cr-1Mo na faixa de 500 °C a 700 °C. Parte 2: avaliação dos parâmetros de encruamento e sensibilidade á taxa de deformação. **Anais ... 7ªCOTEQ**, Florianópolis (SC), p. 1-8, 2003.
- [10] REIS SOBRINHO, J.F. **Correlação entre os comportamentos de tração a quente e fluência do aço 2,25Cr-1Mo na faixa de temperatura de 500°C a 700°C** Tese de Doutorado, PPG/CEM - UFSCar, março de 2003.
- [11] RIZZIA, E.; HAHNER, P.C. On the Portevin–Le Chatelier effect: theoretical modeling and numerical results, **International Journal of Plasticity**, v. 20, p. 121–165, 2004.
- [12] MCCORMICK, P.G.; LING, C.P. Numerical modelling of the Portevin-Le-Chatelier, **Acta Metallurgica**, v.43, n. 5, p. 1969-1977, 1995.
- [13] DE ALMEIDA, L.H.; LE MAY, I.; EMYGDIO, P.R.O. Mechanistic modeling of dynamic strain aging in austenitic stainless steels; **COPPE**, Rio de Janeiro; 1997.
- [14] KAINPING, J.; PENG, Y. Effect of dynamic strain aging on high temperature properties of austenitic stainless steel, **Materials Science and Engineering A**, v. 379, p. 372-377, 2004.
- [15] BRATHE, L., JOSSEFSON, L. Estimation of norton bailey parameters from creep rupture data, **Metals Science**, v. 13, p. 660-664, 1979.
- [16] BLUM, W., EISENLOHR, P., BREUTINGER, F. Understanding creep a review, **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 33, p.291-303, 2002.

- [17] NABARRO, F.R.N. Creep at very low rates, **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 33, p. 213-218, 2002.
- [18] WILSHIRE, B. Observations, theories, and predictions of high temperature creep behaviour, **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 29, p. 241-248, 2002.
- [19] LANGDON, T.G. Dislocation creep. **Proceedings** of the conference to celebrate the fiftieth anniversary of the concept of dislocation in crystals, London, p. 221-238, 1985.
- [20] LANGDON, T.G. Creep at low stress: An evolution of diffusion creep and Harper-Dorn creep as viable creep mechanism, **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 33, p. 249-259, 2002.
- [21] EVANS, D.R.; WILSHIRE, B. Introduction to creep. **The Institute of metals**, Swansea, UK, p. 32-35, 1993.
- [22] NABARRO, F.R.N. **Report** on Conference on Strength of Solids, Physical Society, London, UK, 1948.
- [23] HERRING, C. **Journal of Applied Physics**, v. 21, p. 437, 1950.
- [24] COBLE, R.L. **Journal of Applied Physics**, v. 34, p. 1679, 1963.
- [25] HARPER, J.G.; DORN, J.E. **Acta Metallurgica**, v. 5, p. 654, 1957.
- [26] EVANS R.W.; WILSHIRE, B. **Creep of metals and alloys**, The Institute of Metals, 1985.

- [27] NORTON, F.H. **The creep of steel at high temperature**. McGraw Hill, New York, 1929.
- [28] MONKMAN F.C. and GRANT N.J. **Proceedings** ASTM Conf. 1956, v. 56, p. 593, 1956.
- [29] LARSON F.R. and MILLER **Journal of Material Transaction**, ASME, v. 74, p. 765, 1952.
- [30] ORR, R.L.; SHERBY, O.D.; DORN, J.E. **Transactions ASM**, v. 46, p. 113, 1954.
- [31] GOLDHOFF, R.M.; HAHN, G.J. Correlation and extrapolation of creep-rupture data of several steels and superalloys using time-temperature parameters, Publ. n° D-8-100 **ASM**, Cleveland, USA, p.199-245, 1968.
- [32] WHITE, W.E.; LE-MAY, I On time-temperature parameters for correlation of creep-rupture data stainless weldments,**ASME Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 100, p. 319-332, 1978.
- [33] MANSON, S. S.; HAFERD, A. M. A linear time-temperature relation for extrapolation of creep and stress-rupture data. **NASA Report** TN 2890, 1952.
- [34] MANSON, S.S.; SUCCOP, C. Stress-rupture properties of Inconel 700 and correlation on the basis of several time-temperature parameters. **ASTM STP 174**, ASTM, Philadelphia, USA, 1956.
- [35] **ASTM E 139-83** (reapproved 90), Annual Book of ASTM Standards, section 3, vol. 03.01, p. 309-319, 1990.

- [36] MANSON, S.S.; ENSIGN, C.R. A specialized model for analysis of creep rupture data by the minimum commitment method. **NASA Tech. Memo.** TMX 52999, Washington, 1971.
- [37] MANSON, S.S.; MURALIDHARAN, U. EPRI **Report CS 317**, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA,USA, 1983.
- [38] PRAGER, M. The omega method – an engineering approach to life assessment, **Journal of Pressure Vessel Technology**, v. 122, n. 3, p. 273-280, 2000.
- [39] STEEN, M. Creep life assessment by low strain rate tensile testing, **International Journal of Pressure Vessel and Piping**, vol.14, p.201-225, 1983.
- [40] OSGERBY, S.; DYSON, B.F. Constant strain rate testing: prediction of stress-strain curves from constant-load creep data. **Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures**. Ed. B.Wilshire and R.W. Evans. The Institute of Materials, London, p. 53-61, 1993.
- [41] BUENO,L.O.; REIS SOBRINHO, F.J. Correlation Between Creep and Hot Tensile Behaviour for 2.25Cr-1Mo Steel from 500°C to 700°C. Part 1: An Assessment According to usual Relations Involving Stress, Temperature, Strain Rate and Rupture Time. **Anais ... SULMAT**, Joinville (SC), p.1-10, 2004.
- [42] REIS SOBRINHO, F.J.; BUENO, L.O. Correlation Between Creep and Hot Tensile Behaviour for 2.25Cr-1Mo Steel from 500°C to 700°C. Part 2: An Assessment According to Different Parameterization Methodologies. **Anais ... SULMAT**, Joinville,SC, p. 1-9, 2004.

- [43] BUENO L.O. Creep behaviour of 2.25Cr-1Mo Steel - an equivalence between hot tensile and creep testing data. **Proceedings** ECC2005 Creep Conf., London, Ed.I.A.Shibli,S. R. Holdsworth, G.Merckling, DEStech Pub.Inc, p. 969-980, 2005.
- [44] BUENO,L.O.;REIS SOBRINHO,J.F. Creep behavior of 2,25Cr-1Mo steel. part 1: correlation involving minimum creep rate, rupture time, stress and temperature: **Proceedings** XVI CBECIMAT, Porto Alegre,RS, p.1-15, 2004.
- [45] REIS SOBRINHO,J.F.; BUENO, L.O. Creep behavior of 2,25Cr-1Mo steel. part 2: application of parametrization methodologies to creep rupture and minimum creep rate data: **Proceedings** XVI CBECIMAT,Porto Alegre,RS, p. 1-12, 2005.
- [46] BUENO, L.O. Máquinas-protótipos para ensaios de fluência em metais a altas temperaturas. parte 1: detalhes de construção e montagem do equipamento. In: **Anais...** II ETUAN/ABM, Rio de Janeiro, RJ, p. 916-934, 1987.
- [47] CONTIN JR., A. **Comportamento de fluência do aço inoxidável AISI 310 a 700°C-Uma análise baseada no modelo de tensão de fricção**, 1986, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), PPG/CEM, UFSCar, 1986.
- [48] KLUEH,R.L.; OAKES Jr.,R.E. High strain rate properties of annealed 2.25Cr-1Mo steel, **Journal of Engineering, Materials and Technology**, v. 98, p. 361-368, 1976.

- [49] KLUEH, R.L.; OAKES Jr.,R.E. Strain rate effects on the elevated temperature behavior of a bainitic 2 ¼ Cr -1 Mo steel, Trans. ASME- **Journal of Engineering Materials and Technology**, v.99, p.350-358, 1977.
- [50] KLUEH, R.L. Heat treatments effects on the tensile properties of annealed 2.25Cr-1Mo steel. **Journal of Nuclear Materials**, v. 68, p. 294-307, 1977.
- [51] KLUEH, R.L. Heat treatment effects on creep and creep rupture behavior of annealed 2.25Cr-1Mo steel, **Metallurgical Transactions A**, v. 9A, p. 1591-1598, 1978.
- [52] KLUEH, R.L. Creep and creep rupture behavior of a bainitic 2 ¼ Cr-1Mo steel, **International Journal of Pressure Vessel and Piping**, v. 8, p. 165-185, 1980.
- [53] VISWANATHAN, R. Damage mechanisms and life assessment of high – temperature components, **ASTM International**, 1993.