



Dissertação de Mestrado

Valmir Sales

**Análise do comportamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 em
diferentes condições de dobramento**

Janeiro de 2013



Valmir Sales

Análise do comportamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 em diferentes condições de dobramento

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFETMG, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais

Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização de Materiais

Orientador: Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Co-orientador: Prof. Dr. Wellington Lopes

Belo Horizonte, janeiro de 2013.

Sales, Valmir.

Análise do comportamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 em diferentes condições de dobramento / Valmir Sales. - 2013.

115 f. : il., tabs., grafs., fotos. -

Orientadora: Elaine Carballo Siqueira Corrêa.

Co-orientador: Wellington Lopes.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2013.

Bibliografia.

1. Conformação Mecânica. 2. Aço Inoxidável Austenítico. 3. Aço Inoxidável Duplex. 4. Deformação Elástica. I. Corrêa, Elaine Carballo Siqueira. II. Lopes, Wellington. II. Título.

CDD: 620.1123



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

*“Análise do Comportamento dos Aços Inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 em
Diferentes Condições no Dobramento”*

Valmir Sales

Dissertação submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais.

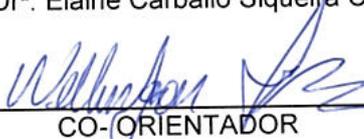
Aprovada em 29 de janero de 2013

Aprovada com ressalvas em _____ de _____ de 2013



ORIENTADORA

Profª Drª. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

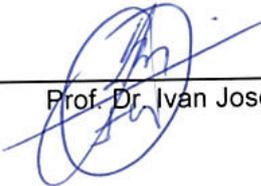


CO-ORIENTADOR

Prof. Dr. Wellington Lopes



Profª. Drª. Maria Celeste Monteiro de Souza


Prof. Dr. Ivan José de Santana

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha esposa Josiane e meus filhos Zaqueu, Kleber, Mariana e Isaak, que sempre estiveram do meu lado, me apoiando, incentivando e muitas vezes se privando de minha presença quando eu era mais necessário e ainda assim continuaram compreendendo, certos da importância de vencer mais uma etapa na carreira profissional e de poder realizar um sonho há muito tempo acalentado.

AGRADECIMENTOS

O apoio para obter um título de mestre é imprescindível. Felizmente sempre encontramos pessoas e instituições que estão sempre dispostos a ajudar. Sei que sem ajuda eu jamais teria chegado aonde cheguei. Desta forma não pode faltar minha gratidão a todos aqueles que se empenharam para que eu vencesse esta batalha.

Primeiramente agradeço a Deus, o Grande Arquiteto do Universo, por me prover de um intelecto capaz de assimilar os ensinamentos que me foram ministrados.

Agradeço também à minha orientadora, Professora Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa, cuja atuação e dedicação foram imprescindíveis por toda a duração do meu curso, especialmente na fase final, sacrificando seus finais de semana para que tudo fosse concluído dentro dos prazos estabelecidos. Foi uma orientadora excepcional.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Wellington Lopes, que sempre se desdobrou para que eu alcançasse meus objetivos.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais, onde sou lotado, pela compreensão das limitações advindas da dedicação que se torna necessária para o desempenho no mestrado.

Ao Professor Cléber Lessa de Moura, da Coordenação de Inglês, pelo curso de inglês instrumental, que foi de grande importância para o processo seletivo em que fui aprovado.

Aos meus colegas de trabalho Paulo Roberto de Souza e Antônio Romero de Paula, que me deram valiosa ajuda na confecção das matrizes nas quais realizei meus experimentos.

Ao aluno bolsista SAE Roberto Wagner de Oliveira Elias, que foi participante ativo do meu trabalho de pesquisa.

Ao pessoal da União Equipamentos Mecânicos: Eng. Fernando Torquetti Júnior, Proprietário; Eng. Paulo Pinto Alves, Gerente de Orçamentos; Jairo Antonio Tonidandel, Gerente de Produção; e Manoel da Silva Pinheiro (Manoelzinho), pela liberalidade e disposição em finalizar as matrizes que foram tão necessárias e úteis para o projeto de pesquisa de meu mestrado.

Por fim, agradeço à empresa siderúrgica *Aperam South America* pela doação das chapas de aço inoxidável SAF 2205.

RESUMO

O dobramento é uma das operações mais importantes de estampagem de chapas, representando uma etapa isolada de processamento do material ou uma das etapas de deformação plástica em outros processos de conformação mecânica. Durante essas operações, entretanto, uma série de irregularidades podem ser desenvolvidas no produto como, por exemplo, a formação de trincas e o fenômeno de recuperação elástica. Dentro deste contexto, o presente trabalho consistiu na análise da operação de dobramento em V de chapas dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205, considerando as características estruturais dos materiais e diferentes condições de processamento. Foram confeccionados dispositivos especialmente para a realização dos experimentos, consistindo em matrizes e punções, envolvendo diferentes parâmetros geométricos, como ângulos e raios de dobramento, dentre outros. Os materiais foram avaliados em três condições distintas: no estado como recebidos e após dois tratamentos térmicos. A análise foi conduzida considerando a possibilidade de ocorrência de trinca nas ligas, o fenômeno de recuperação elástica e a obtenção da distribuição de microdureza e deformação na seção dos corpos de prova. Para as condições investigadas, não foi observada a ocorrência de trincas nos dois aços. De maneira geral, para ambos materiais, independente da condição prévia ao ensaio, o fenômeno de recuperação elástica aumentou com o raio e com o ângulo de dobramento, sendo que o aço inoxidável SAF 2205 exibiu níveis de retorno elástico mais elevados que o aço inoxidável AISI 304. Por fim, as duas ligas exibiram distribuições tanto de dureza como de deformação heterogêneas.

Palavras-chave: dobramento, aço inoxidável, deformação.

ABSTRACT

Bending is one of the most important sheet forming operations, performed alone or associated with other plastic deformation processes. During these operations, however, some irregularities can be observed, such as the development of cracks and the elastic recovery phenomenon. The aim of this work was the analysis of the V bending operation of AISI 304 and SAF 2205 stainless steel sheets, considering the structural features of the materials and several processing conditions. Special devices were developed for the experiments, consisting of dies and punches, involving different geometric parameters, such as bending angles and radius. The evaluation was carried out in the as received metals and after two heat treatments. The study comprised the analysis of the occurrence of cracks, the evaluation of elastic recovery and the achievement of microhardness and deformation distributions. The presence of cracks was not observed in both materials. In general, elastic recovery increased with die angle and punch radius values. In this case, the phenomenon was more pronounced in the SAF 2205 stainless steel. Both metallic alloys exhibited heterogeneous hardness and deformation distributions.

Keywords: bending, stainless steel, deformation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1	Exemplos do efeito do cromo na resistência à corrosão dos aços: (a) resultado relativo à exposição por 10 anos a uma atmosfera industrial e (b) resultado associado à exposição por 48 horas ao ar a 1000°C (CHIAVERINI, 2005).	28
Figura 3.2	Diagrama de Schaeffler, indicando a composição química associada aos diferentes grupos de aços inoxidáveis (COLPAERT, 2008).	29
Figura 3.3	Diagrama de equilíbrio de fases Fe-Cr, no qual são observadas as fases líquida L e sólidas, como ferrita α e austenita γ (COLPAERT, 2008).	30
Figura 3.4	Fotomicrografias de aços inoxidáveis ferríticos: (a) aço AISI 409 e (b) aço AISI 430 (LOPES, 2009; DURAND-CHARRE, 2004).	31
Figura 3.5	Fotomicrografias de aços inoxidáveis martensíticos temperados e revenidos: (a) aço AISI 410 e (b) aço AISI 420 (ASM HANDBOOK, 2004).	33
Figura 3.6	Principais tipos de aços inoxidáveis austeníticos comerciais (PADILHA & GUEDES, 1994).	34
Figura 3.7	Fotomicrografias de aços inoxidáveis austeníticos forjados e solubilizados: (a) aço AISI 304 e (b) aço AISI 317L (COLPAERT, 2008).	35
Figura 3.8	Curva tensão – deformação obtida em um ensaio de tração conduzido à temperatura ambiente do aço inoxidável austenítico AISI 301 (SILVA & MEI, 2010).	36
Figura 3.9	Efeito da magnitude da deformação por tração na transformação martensítica por deformação plástica do aço inoxidável AISI 304: (a) volume % das fases em função da deformação e (b) fotomicrografia do material após deformação de 10% (DE et al., 2004).	37
Figura 3.10	Principais tipos de aços inoxidáveis duplex comerciais (SILVA & MEI, 2010).	38
Figura 3.11	Fotomicrografias de aços inoxidáveis austenoferríticos: (a) aço UNS S 32205 solubilizado e (b) aço UNS 32750 solubilizado e resfriado	

	em água (ASM HANDBOOK, 2004; COLPAERT, 2008).	39
Figura 3.12	Representação esquemática de curvas tempo - temperatura - transformação dos possíveis precipitados, como carbonetos e fases intermetálicas, em aços inoxidáveis duplex, assim como os efeitos dos elementos de liga sobre os mesmos (COLPAERT, 2008).	40
Figura 3.13	Fotomicrografias do aço inoxidável UNS 31803 tratado termicamente a 750°C por 60 minutos e resfriado em água evidenciando a presença das fases intermetálicas sigma σ e chi χ : (a) e (b) regiões da amostra e ampliações distintas (ESCRIBA et al., 2009).	40
Figura 3.14	Fotomicrografias do aço inoxidável UNS 31803 tratado termicamente a 900°C por 60 minutos e resfriado em água evidenciando a presença de carbonetos e da fase intermetálica sigma σ : (a) e (b) regiões da amostra e ampliações distintas (LEE et al., 1999).	41
Figura 3.15	Representação esquemática de uma operação de embutimento profundo de um cilindro (MARCINIAK et al., 2002).	42
Figura 3.16	Operações mais usuais associadas à estampagem (DIETER, 1981).	42
Figura 3.17	Representação dos esforços atuantes e da linha neutra no dobramento.	43
Figura 3.18	Representação do dobramento de uma chapa com suas características geométricas (ASM HANDBOOK, 2000; GARCIA et al., 2000).	44
Figura 3.19	Representação da tensão e da deformação no dobramento de chapas: (a) tensões e deformações principais e (b) relação entre a deformação nas fibras da superfície externa de dobramento na fratura e o quociente largura / espessura da chapa (ASM HANDBOOK, 2000).	46
Figura 3.20	Exemplificação do fenômeno de retorno elástico ou efeito mola em chapas durante o dobramento: (a) sem dobramento, (b) durante o dobramento e (c) após o dobramento (GARCIA et al., 2000).	47
Figura 3.21	Representação esquemática do fenômeno de retorno elástico no dobramento de uma chapa (DIETER, 1981).	48
Figura 3.22	Retorno elástico observado no dobramento de chapas metálicas – efeito do ângulo de dobramento: (a) e (b) aço baixo carbono com 0,5mm e 1mm de espessura, respectivamente; (c) e (d) latão com 0,5mm e 1mm de espessura, respectivamente (TEKINER, 2004).	49
Figura 3.23	Retorno elástico observado no dobramento de chapas de uma liga de	

	alumínio AA5754-0: (a) e (b) efeito da pré-deformação por tração no expoente e no coeficiente de encruamento, respectivamente; (c) efeito da pré-deformação na relação entre o ângulo de retorno elástico e o ângulo inicial de dobramento (TOROS et al., 2010).	51
Figura 3.24	Representação do ensaio de dobramento guiado sem o emprego de matrizes (SOUZA, 1982).	53
Figura 3.25	Representação do ensaio de dobramento guiado com emprego de matriz em V (ABDULLAH et al., 2012).	53
Figura 3.26	Representação do ensaio de dobramento guiado com emprego de matriz em U (ABDULLAH et al., 2012).	54
Figura 3.27	Representação do ensaio de dobramento semi-guiado – uma extremidade do corpo de prova fixa e força aplicada na outra extremidade (SOUZA, 1982).	54
Figura 3.28	Representação do ensaio de dobramento semi-guiado – uma extremidade do corpo de prova fixa e força aplicada na região próxima ao mandril (SOUZA, 1982).	54
Figura 3.29	Representação do ensaio de dobramento semi-guiado – uma extremidade do corpo de prova fixa (SOUZA, 1982).	55
Figura 3.30	Representação do ensaio de dobramento livre – dobramento de 180° (SOUZA, 1982).	55
Figura 3.31	Representação do ensaio de dobramento com achatamento (ASM HANDBOOK, 2000).	56
Figura 4.1	Fluxograma relativo à etapa experimental de desenvolvimento de dispositivos para a realização de ensaios de dobramento.	57
Figura 4.2	Fluxograma relativo à etapa experimental de caracterização dos materiais no estado inicial e após os tratamentos térmicos.	58
Figura 4.3	Fluxograma relativo à etapa experimental de realização dos ensaios de dobramento.	58
Figura 4.4	Fluxograma relativo à etapa experimental para obtenção da distribuição de deformação dos metais após dobramento através da técnica dos perfis de microdureza.	59
Figura 4.5	Projeto da matriz para dobramento em V com abertura de 20mm.	61
Figura 4.6	Representação esquemática da matriz para dobramento em V com	

	abertura de 20mm.	62
Figura 4.7	Projeto da matriz para dobramento em V com abertura de 40mm.	63
Figura 4.8	Representação esquemática da matriz para dobramento em V com abertura de 40mm.	63
Figura 4.9	Projeto do cutelo com raio de 2mm para a realização de dobramento.	64
Figura 4.10	Projeto do cutelo com raio de 4mm para a realização de dobramento.	64
Figura 4.11	Projeto do cutelo com raio de 6mm para a realização de dobramento.	65
Figura 4.12	Projeto do cutelo com raio de 8mm para a realização de dobramento.	65
Figura 4.13	Projeto do cutelo com raio de 10mm para a realização de dobramento	66
Figura 4.14	Representação esquemática dos cutelos com raios de 2mm, 4mm, 6mm, 8mm e 10mm projetados para a realização de dobramento.	66
Figura 4.15	Projeto do suporte para os cutelos de dobramento.	67
Figura 4.16	Representação esquemática do suporte para os cutelos de dobramento.	67
Figura 4.17	Equipamento de usinagem por eletroerosão a fio marca <i>Baoma</i> : (a) vista geral e (b) detalhe da máquina em operação.	67
Figura 4.18	Corpo de prova empregado nos experimentos de dobramento: (a) representação esquemática e (b) imagem.	68
Figura 4.19	Guilhotinas utilizadas no corte dos corpos de prova para os ensaios de dobramento: (a) equipamento marca <i>Newton</i> modelo TM 10 e (b) equipamento marca <i>Pexto</i> modelo U-136-D.	69
Figura 4.20	Retificadora marca <i>Zocca</i> , utilizada para acertar as dimensões e o acabamento superficial dos corpos de prova para os ensaios de dobramento: (a) vista geral e (b) detalhe dos corpos de prova.	69
Figura 4.21	Corpo de prova empregado nos ensaios de tração: (a) representação esquemática e (b) imagem (ASTM E-8,).	70
Figura 4.22	Forno elétrico marca <i>Magnus</i> empregado nos tratamentos térmicos.	71
Figura 4.23	Microscópio óptico marca <i>Fortel</i> utilizado na caracterização microestrutural dos metais: (a) vista geral com o sistema de digitalização e (b) detalhe.	72
Figura 4.24	Difratômetro de raios-X marca <i>Shimadzu</i> empregado na caracterização microestrutural dos metais: (a) vista geral e (b) detalhe do sistema de fixação das amostras e goniômetro.	73

Figura 4.25	Máquina universal de ensaios marca <i>Instron</i> : (a) vista geral e (b) detalhe de um dos corpos de prova durante o ensaio.	73
Figura 4.26	Microdurômetro Vickers marca <i>Shimadzu</i> empregado no trabalho: (a) vista geral e (b) detalhe.	75
Figura 4.27	Prensa marca <i>Manley</i> empregada nos ensaios de dobramento: (a) vista geral e (b) detalhe do equipamento com os dispositivos durante um ensaio.	76
Figura 4.28	Lupa marca <i>Metrimpex</i> empregada na análise da superfície externa de dobramento dos corpos de prova: (a) vista geral e (b) detalhe durante uma avaliação.	77
Figura 4.29	Goniômetro marca <i>Helias</i> empregado na determinação do ângulo final de dobramento para posterior cálculo do retorno elástico: (a) equipamento e (b) corpo de prova durante a medição.	78
Figura 4.30	Exemplo de utilização da técnica dos perfis de microdureza em barras de alumínio comercialmente puro: (a) distribuição de microdureza Vickers, (b) relação entre a deformação e a microdureza e (c) distribuição de deformação (CETLIN, 1984).	79
Figura 4.31	Representação dos ensaios de microdureza conduzidos nos aços inoxidáveis após dobramento para posterior determinação da distribuição de deformação nos corpos de prova: (a) região/linha e (b) posicionamento dos ensaios/impressões.	81
Figura 5.1	Micrografias (MO) dos aços inoxidáveis no estado inicial: (a) aço AISI 304 e (b) aço SAF 2205.	82
Figura 5.2	Difratogramas dos aços inoxidáveis no estado inicial: (a) aço AISI 304 e (b) aço SAF 2205 (austenita γ , ferrita α , martensita α').	83
Figura 5.3	Curvas tensão convencional (MPa) – deformação convencional obtidas no ensaio de tração dos materiais no estado como recebidos: (a) aço AISI 304 e (b) aço SAF 2205.	83
Figura 5.4	Micrografias (MO) do aço inoxidável AISI 304 tratado termicamente: (a) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 15 minutos e (b) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 60 minutos.	85
Figura 5.5	Difratogramas do aço inoxidável AISI 304 tratado termicamente: (a) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 15 minutos e (b)	

	temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 60 minutos.	85
Figura 5.6	Curvas tensão convencional (MPa) – deformação convencional obtidas no ensaio de tração do aço AISI 304 após o tratamento térmico: (a) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 15 minutos e (b) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 60 minutos.	86
Figura 5.7	Micrografias (MO) do aço inoxidável SAF 2205 tratado termicamente: (a) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 15 minutos e (b) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 60 minutos.	87
Figura 5.8	Difratogramas do aço inoxidável SAF 2205 tratado termicamente: (a) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 15 minutos e (b) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 60 minutos.	87
Figura 5.9	Curvas tensão convencional (MPa) – deformação convencional obtidas no ensaio de tração do aço SAF 2205 após o tratamento térmico: (a) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 15 minutos e (b) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 60 minutos.	88
Figura 5.10	Imagens das matrizes confeccionadas em aço AISI 1045 temperado e revenido para a realização de ensaios de dobramento em V: (a), (b) e (c) matriz com abertura de 20mm; (d), (e) e (f) matriz com abertura de 40mm.	89
Figura 5.11	Imagens dos cutelos com raios de 2mm, 4mm, 6mm, 8mm e 10mm confeccionados m aço AISI 1045 temperado e revenido para a realização de dobramento: (a) e (b) vistas distintas.	90
Figura 5.12	Imagens do suporte confeccionado para adaptar os cutelos de dobramento à prensa: (a) dispositivo e parafusos e (b) dispositivo com um dos cutelos acoplado.	90
Figura 5.13	Imagens da superfície externa do aço inoxidável AISI 304 no estado como recebido após o dobramento em V realizado com ângulo de 90° - raio de: (a) 2mm, (b) 6mm e (c) 10mm.	91
Figura 5.14	Imagens da superfície externa do aço inoxidável SAF 2205 no estado como recebido após o dobramento em V realizado com ângulo de 90°	

	- raio de: (a) 2mm, (b) 6mm e (c) 10mm.	91
Figura 5.15	Imagens de corpos de prova de aço inoxidável SAF 2205 no estado como recebido após o dobramento com raio de 6mm – ângulo de dobramento: (a) 60° e (b) 90.	93
Figura 5.16	Imagens de corpos de prova de aço inoxidável AISI 304 tratado termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de encharque de 15 minutos após o dobramento com raio de 2mm – ângulo de dobramento: (a) 30° e (b) 90.	93
Figura 5.17	Ângulo de retorno elástico verificado no dobramento dos aços inoxidáveis no estado como recebidos: (a), (c), (e) aço SAF 2205 – dobramento a 30°, 60°, 90°, respectivamente; (b), (d), (f) aço AISI 304 – dobramento a 30°, 60°, 90°, respectivamente.	96
Figura 5.18	Ângulo de retorno elástico verificado no dobramento dos aços inoxidáveis tratados termicamente a 1050°C por 15 minutos: (a), (c), (e) aço SAF 2205 – dobramento a 30°, 60°, 90°, respectivamente; (b), (d), (f) aço AISI 304 – dobramento a 30°, 60°, 90°, respectivamente.	97
Figura 5.19	Ângulo de retorno elástico verificado no dobramento dos aços inoxidáveis tratados termicamente a 1050°C por 60 minutos: (a), (c), (e) aço SAF 2205 – dobramento a 30°, 60°, 90°, respectivamente; (b), (d), (f) aço AISI 304 – dobramento a 30°, 60°, 90°, respectivamente.	98
Figura 5.20	Relação entre a deformação e a dureza Vickers para os aços: (a), (c), (e) SAF 2205 como recebido, tratado a 1050°C por 15 minutos e tratado a 1050°C por 60 minutos, respectivamente; (b), (d), (f) AISI 304 como recebido, tratado a 1050°C por 15 minutos e tratado a 1050°C por 60 minutos, respectivamente.	102
Figura 5.21	Distribuição de dureza Vickers no aço inoxidável SAF 2205 como recebido após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio = 8mm.	105
Figura 5.22	Distribuição de dureza Vickers no aço inoxidável SAF 2205 tratado a 1050°C por 15 minutos após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio =	

	8mm.	106
Figura 5.23	Distribuição de dureza Vickers no aço inoxidável AISI 304 como recebido após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio = 8mm.	106
Figura 5.24	Distribuição de dureza Vickers no aço inoxidável AISI 304 tratado a 1050°C por 15 minutos após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio = 8mm.	107
Figura 5.25	Distribuição de deformação no aço inoxidável SAF 2205 como recebido após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio = 8mm.	108
Figura 5.26	Distribuição de deformação no aço inoxidável SAF 2205 tratado a 1050°C por 15 minutos após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio = 8mm.	108
Figura 5.27	Distribuição de deformação no aço inoxidável AISI 304 como recebido após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio = 8mm.	109
Figura 5.28	Distribuição de deformação no aço inoxidável AISI 304 tratado a 1050°C por 15 minutos após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio = 8mm.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Especificação técnica (% em peso) de alguns aços inoxidáveis ferríticos (CHIAVERINI, 2005).	31
Tabela 3.2	Especificação técnica (% em peso) de alguns aços inoxidáveis martensíticos (CHIAVERINI, 2005).	31
Tabela 4.1	Composição química (% em peso) do aço inoxidável AISI 304 empregado no trabalho.	59
Tabela 4.2	Especificação técnica do aço inoxidável AISI 304 (CHIAVERINI, 2005).	60
Tabela 4.3	Composição química (% em peso) do aço inoxidável SAF 2205 empregado no trabalho.	60
Tabela 4.4	Especificação técnica do aço inoxidável SAF 2205 (SILVA & MEI, 2010).	60
Tabela 4.5	Parâmetros considerados para as variáveis do ensaio de dobramento no desenvolvimento dos dispositivos.	61
Tabela 4.6	Parâmetros gerais dos ensaios de dobramento conduzidos no trabalho.	76
Tabela 5.1	Propriedades mecânicas dos materiais no estado como recebidos.	84
Tabela 5.2	Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304 tratado termicamente.	86
Tabela 5.3	Propriedades mecânicas do aço inoxidável SAF 2205 tratado termicamente.	88
Tabela 5.4	Ângulos de retorno elástico (minutos) no dobramento do aço inoxidável SAF 2205 no estado como recebido.	94
Tabela 5.5	Ângulos de retorno elástico (minutos) no dobramento do aço inoxidável SAF 2205 tratado termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de 15 minutos.	94
Tabela 5.6	Ângulos de retorno elástico (minutos) no dobramento do aço inoxidável SAF 2205 tratado termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de 60 minutos.	94
Tabela 5.7	Ângulos de retorno elástico (minutos) no dobramento do aço inoxidável AISI 304 no estado como recebido.	95

Tabela 5.8	Ângulos de retorno elástico (minutos) no dobramento do aço inoxidável AISI 304 tratado termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de 15 minutos.	95
Tabela 5.9	Ângulos de retorno elástico (minutos) no dobramento do aço inoxidável AISI 304 tratado termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de 60 minutos.	96
Tabela 5.10	Valores de deformação real e dureza Vickers das amostras tracionadas de aço inoxidável SAF 2205 no estado como recebidas.	100
Tabela 5.11	Valores de deformação real e dureza Vickers das amostras tracionadas de aço inoxidável SAF 2205 tratadas termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de encharque de 15 minutos.	100
Tabela 5.12	Valores de deformação real e dureza Vickers das amostras tracionadas de aço inoxidável SAF 2205 tratadas termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de encharque de 60 minutos.	100
Tabela 5.13	Valores de deformação real e dureza Vickers das amostras tracionadas de aço inoxidável AISI 304 no estado como recebidas.	100
Tabela 5.14	Valores de deformação real e dureza Vickers das amostras tracionadas de aço inoxidável AISI 304 tratadas termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de encharque de 15 minutos.	101
Tabela 5.15	Valores de deformação real e dureza Vickers das amostras tracionadas de aço inoxidável AISI 304 tratadas termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de encharque de 60 minutos.	101
Tabela 5.16	Valores de dureza Vickers do aço inoxidável SAF 2205 como recebido após dobramento com ângulo de 90° e raios de 2mm e 8mm de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente).	103
Tabela 5.17	Valores de dureza Vickers do aço inoxidável SAF 2205 tratado a 1050°C por 15 minutos após dobramento com ângulo de 90° e raios de 2mm e 8mm de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente).	103
Tabela 5.18	Valores de dureza Vickers do aço inoxidável AISI 304 como recebido após dobramento com ângulo de 90° e raios de 2mm e 8mm de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e	

	interna de dobramento, respectivamente).	104
Tabela 5.19	Valores de dureza Vickers do aço inoxidável AISI 304 tratado a 1050°C por 15 minutos após dobramento com ângulo de 90° e raios de 2mm e 8mm de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente).	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI – *American Iron and Steel Institute*

CCC – estrutura cristalina cúbica de corpo centrado

HCP – estrutura cristalina hexagonal compacta

SAF – *Sandvik Austenitic Ferritic*

UNS – *Unified Numbering System*

LISTA DE SÍMBOLOS

α – fase ferrita

α – ângulo de dobramento

α_i – ângulo inicial de dobramento

α_f – ângulo final de dobramento

α' – fase martensita

ε – fase épsilon

ε_R – deformação real

ε_1 – deformação circunferencial

ε_2 – deformação trasnversal

ε_3 – deformação radial

γ – fase austenita

γ_2 – fase intermetálica

π – fase intermetálica pi

σ – fase intermetálica sigma

σ_1 – tensão circunferencial

σ_2 – tensão trasnversal

σ_3 – tensão radial

χ – fase intermetálica chi

A_i = área inicial da seção transversal

A_f = área final da seção transversal

b – largura da chapa

e – deformação

E – módulo de elasticidade

F_d – força de dobramento

G – fase intermetálica

k – coeficiente de resistência

K – índice para a determinação da intensidade do retorno elástico

L – fase líquida

L – comprimento de dobramento

L_E – tensão limite de escoamento

n – expoente de encruamento

q – redução de área

R – fase intermetálica

R – raio de dobramento

R_i – raio inicial de dobramento

R_f – raio final de dobramento

R_{\min} – raio mínimo de dobramento

t – espessura da chapa

ν – coeficiente de Poisson

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	25
2. OBJETIVOS	26
2.1. Objetivo Geral	26
2.2. Objetivos Específicos	26
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1. Aços Inoxidáveis	27
3.1.1. Características gerais dos aços inoxidáveis	27
3.1.2. Principais tipos de aços inoxidáveis	29
3.2. Dobramento de Chapas Metálicas	41
3.2.1. Características gerais do dobramento de chapas	41
3.2.2. Recuperação elástica no dobramento de chapas	46
3.2.3. Ensaios de dobramento de chapas	52
4. MATERIAIS E MÉTODOS	57
4.1. Descrição Geral do Trabalho Desenvolvido	57
4.2. Materiais	59
4.3. Projeto e Confeção dos Dispositivos para Realização do Dobramento	60
4.4. Corpos de Prova	68
4.5. Tratamentos Térmicos	70
4.6. Caracterização Microestrutural dos Materiais	71
4.7. Ensaios de Tração	72
4.8. Ensaios de Microdureza	74
4.9. Dobramento dos Corpos de Prova	75
4.9.1. Realização dos ensaios de dobramento	75
4.9.2. Avaliação da superfície de dobramento dos corpos de prova	76
4.9.3. Análise do retorno elástico dos corpos de prova	77
4.9.4. Determinação da distribuição de deformação no dobramento	78
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
5.1. Caracterização dos Materiais no Estado Inicial	82
5.2. Caracterização dos Materiais Após os Tratamentos Térmicos	84
5.3. Dispositivos Projetados e Confeccionados para a Realização de Dobramento	88

5.4. Avaliação da Superfície dos Materiais após o Dobramento	90
5.5. Análise do Retorno Elástico dos Materiais no Dobramento	92
5.6. Relação entre a Deformação e a Dureza dos Aços Inoxidáveis	99
5.7. Distribuição de Deformação nos Aços Inoxidáveis após o Dobramento	103
6. CONCLUSÕES	110
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
8. REFERÊNCIAS	112

1. INTRODUÇÃO

A estampagem de chapas compreende uma série de operações responsáveis pela mudança da forma e das dimensões do material a partir da combinação de diferentes tipos de esforços mecânicos aplicados em matrizes, sendo esse processo tipicamente conduzido a frio.

Dentre os processos de estampagem de chapas, podem ser citadas as operações de repuxamento, de estiramento e de dobramento, observadas, por exemplo, durante a fabricação de diversos componentes automotivos. Durante essas operações, entretanto, uma série de irregularidades ou anomalias podem ser desenvolvidas no produto que está sendo estampado. Neste caso, como problemas ou anomalias, pode-se mencionar, por exemplo, a ocorrência de trincas e do fenômeno de recuperação elástica.

A recuperação ou retorno elástico consiste na mudança dimensional que um material experimenta devido à retirada dos esforços mecânicos necessários à mudança de forma do mesmo, ou seja, quando a ferramenta responsável pela deformação da chapa é removida do contato com a mesma. Esse fenômeno depende de diversos fatores, sendo mais estudados aqueles relacionados aos parâmetros de processo, como o atrito, as condições de lubrificação e as características geométricas da operação. No entanto, aspectos relacionados às características estruturais dos materiais, tais como o arranjo microestrutural dos mesmos em termos dos constituintes e das fases, tamanho de grão, possibilidade da ocorrência de possíveis transformações de fase durante o próprio ciclo de estampagem, dentre outros, também parecem influenciar nos resultados.

Em adição à ocorrência de retorno elástico, a distribuição heterogênea de tensão e de deformação plástica nas operações de estampagem de chapas contribui para permitir ainda a ocorrência de regiões com concentrador de tensão que podem, por sua vez, dar origem ao aparecimento de trincas e falhas dos produtos conformados.

Dentro deste contexto, neste trabalho foi investigado o comportamento dos aços inoxidáveis SAF 2205 e AISI 304 em diferentes condições de dobramento, em termos de ocorrência de possíveis trincas na operação, do fenômeno de recuperação elástica e da análise das distribuições de microdureza e deformação nos metais após a deformação.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho de pesquisa foi a análise da operação de dobramento de chapas de aço inoxidável AISI 304 e aço inoxidável SAF 2205, considerando as características estruturais do material e diferentes condições de dobramento.

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são listados a seguir.

- Projeto e confecção de matrizes e punções para a realização da operação de dobramento de chapas com diferentes parâmetros geométricos.
- Análise do efeito do ângulo e do raio de dobramento na ocorrência de fratura dos materiais.
- Análise do efeito do ângulo e do raio de dobramento no retorno elástico dos materiais.
- Desenvolvimento de expressões entre a deformação real e a dureza dos materiais em um processo de deformação plástica uniaxial.
- Determinação das distribuições de dureza ao longo da seção transversal dos materiais dobrados e análise do efeito dos parâmetros da operação de deformação nas mesmas.
- Determinação das distribuições de deformação ao longo da seção transversal dos materiais dobrados e análise do efeito dos parâmetros da operação de deformação nas mesmas.
- Análise dos efeitos das características estruturais do metal nos resultados através da comparação entre os resultados obtidos para os metais no estado como recebidos e após tratamentos térmicos e entre os dois aços inoxidáveis investigados no trabalho.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aços Inoxidáveis

3.1.1. Características gerais dos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro, carbono e cromo, podendo conter ainda outros elementos como, por exemplo, níquel e molibdênio, de acordo com as operações de fabricação a serem empregadas e as propriedades finais desejadas. Em geral, são materiais caracterizados por exibirem elevada resistência à corrosão, podendo apresentar ainda outras propriedades, como tenacidade e resistência mecânica, inclusive em temperaturas elevadas.

A resistência à corrosão mencionada está associada basicamente à presença do cromo, em uma quantidade mínima de 10% a 12% (em peso), valor indicado de acordo com a bibliografia (KRAUSS, 1990; CHIAVERINI, 2005; SILVA & MEI, 2010). Esse elemento de liga possibilita a formação de filmes ou camadas muito finas de óxido, de apenas algumas unidades atômicas na espessura, cerca de 0,02µm, que protegem o material de ataques subsequentes em meios diversos, fenômeno conhecido como passividade (KRAUSS, 1990; CHIAVERINI, 2005; BHADSHIA & HONEYCOMBE, 2006).

Na Figura 3.1 podem ser observados exemplos do efeito do cromo na resistência à corrosão dos aços, tanto à temperatura ambiente em uma atmosfera classificada como industrial, como ao ar a 1000°C (CHIAVERINI, 2005). Nota-se que, para a primeira situação, a ocorrência de corrosão diminui com o teor de cromo e que, a partir de 10-11%, praticamente não é observado o fenômeno no metal. Para os aços submetidos a 1000°C com atmosfera ao ar, também é observado decréscimo da corrosão com a presença de cromo, entretanto, para ausência de corrosão, teores mais elevados devem ser considerados.

De maneira geral, apesar de designados como “inoxidáveis”, os aços abordados no presente trabalho estão sujeitos a diversas formas de corrosão, que podem ser generalizadas ou localizadas. O comportamento do material em relação à ocorrência ou não de corrosão e, quando for o caso, o tipo e sua magnitude, irão ser determinados pela possibilidade de formação da camada de passividade, sua impermeabilidade e a taxa de dissolução da mesma

(SILVA & MEI, 2010). Esses, por sua vez, irão depender especialmente da composição química e do arranjo interno da liga, além das características do meio ao qual o metal é submetido.

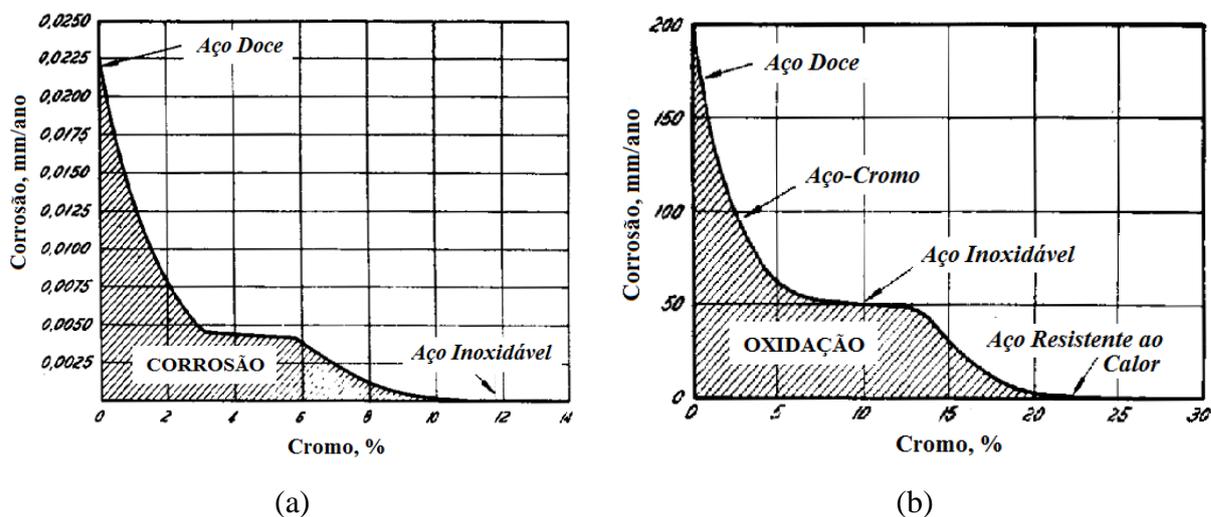


Figura 3.1 – Exemplos do efeito do cromo na resistência à corrosão dos aços: (a) resultado relativo à exposição por 10 anos a uma atmosfera industrial e (b) resultado associado à exposição por 48 horas ao ar a 1000°C (CHIAVERINI, 2005).

Considerando a composição química, diferentes microestruturas são desenvolvidas nos aços inoxidáveis e, como suas propriedades estarão diretamente associadas às mesmas, esses materiais são classificados essencialmente em cinco grupos: ferríticos, austeníticos, martensíticos, endurecíveis por precipitação e duplex (COLPAERT, 2008). Uma vez que diversos elementos podem estar presentes, é usual empregar uma representação simplificada das relações das fases com a composição, baseada nos conceitos de cromo equivalente $Cr_{equivalente}$ e níquel equivalente $Ni_{equivalente}$, conforme as Equações 3.1 e 3.2 apresentadas a seguir. Dessa forma, obtém-se o chamado Diagrama de Schaeffler (Figura 3.2), através do qual podem ser verificadas as composições químicas associadas aos diferentes grupos de aços inoxidáveis e a alguns tipos específicos, classificados segundo a norma AISI (*American Iron and Steel Institute*).

$$Cr_{equivalente} = \% Cr + 1,5 X \% Si + \% Mo$$

3.1

$$Ni_{\text{equivalente}} = \% Ni + 30 X (\% C + \% N) + 0,5 X (\% Mn + \% Cu + \% Co)$$

3.2

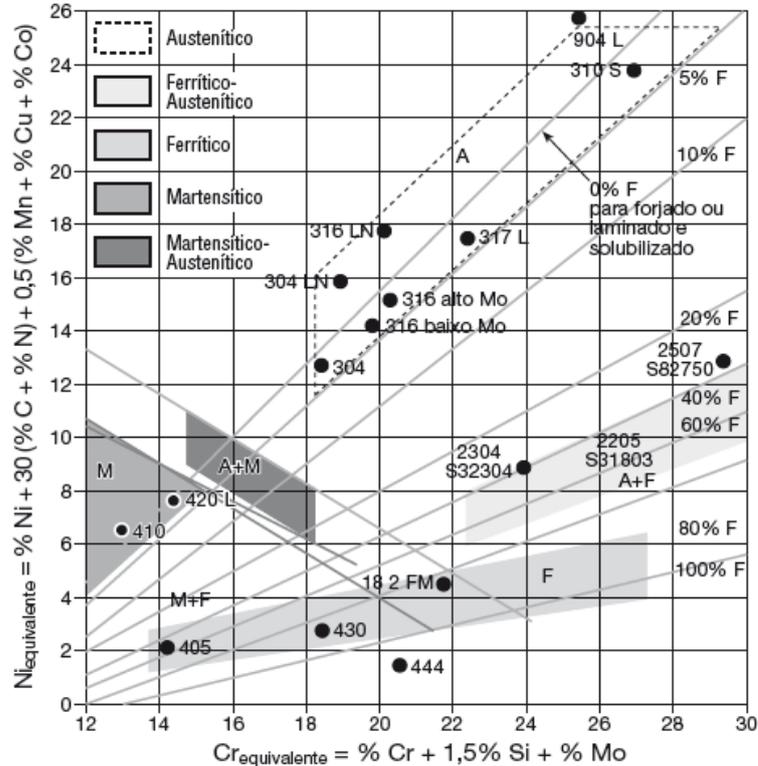


Figura 3.2 – Diagrama de Schaeffler, indicando a composição química associada aos diferentes grupos de aços inoxidáveis (COLPAERT, 2008).

A descrição das características principais de cada um dos grupos de aços inoxidáveis mencionados anteriormente é exibida no item a seguir, no qual são destacados principalmente os aços austeníticos e duplex, investigados no presente trabalho de pesquisa.

3.1.2. Principais tipos de aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis ferríticos são aqueles em cuja composição química o principal elemento de liga é o cromo, de 15% a 30% em peso, e o teor de carbono é relativamente baixo, com eventuais adições de molibdênio, nióbio ou titânio (COUTINHO, 1992). De maneira geral, considera-se que a composição química mencionada leva à estabilização completa da estrutura ferrítica, não sendo possível obter um aumento de resistência mecânica pronunciado

através de tratamentos térmicos (KRAUSS, 1990). Entretanto, apesar da definição clássica de que “são ligas cuja composição se situa à direita do campo austenítico no diagrama Fe-Cr” (SILVA & MEI, 2010), exibido na Figura 3.3, diversos aços deste grupo podem apresentar estrutura austenítica se aquecidos a determinadas temperaturas e, conseqüentemente, no resfriamento, exibir estrutura martensítica (COLPAERT, 2010; SILVA & MEI, 2010).

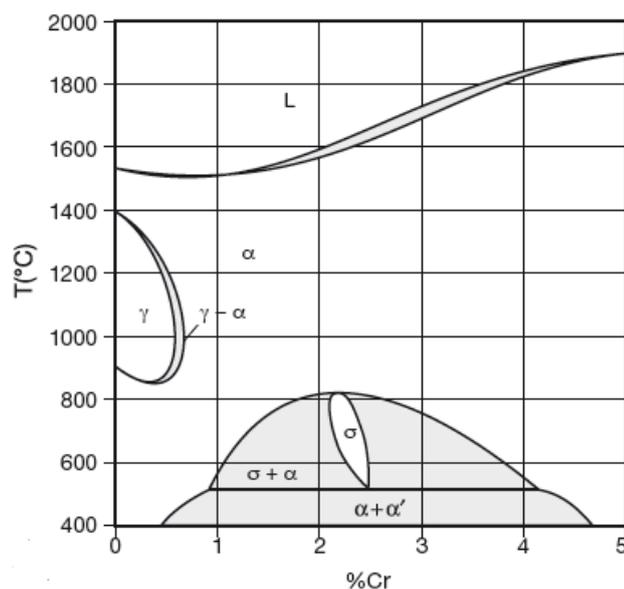


Figura 3.3 – Diagrama de equilíbrio de fases Fe-Cr, no qual são observadas as fases líquida L e sólidas, como ferrita α e austenita γ (COLPAERT, 2008).

Como exemplos das ligas ferríticas, podem ser citados os aços AISI 430, AISI 409 e AISI 446, cujas especificações técnicas são exibidas na Tabela 3.1 (CHIAVERINI, 2005). Na Figura 3.4 são apresentados exemplos de fotomicrografias obtidas através de microscopia óptica de amostras dos aços AISI 409 e AISI 430 (LOPES, 2009; DURAND-CHARRE, 2004). Em ambas as imagens pode ser notada a presença de grãos equiaxiais de ferrita.

Por fim, os aços inoxidáveis ferríticos exibem como propriedade geral boa resistência à corrosão, porém inferior àquela observada nos aços austeníticos (descritos posteriormente) (SILVA & MEI, 2010). Neste caso, um melhor desempenho é verificado em atmosferas urbanas e rurais, enquanto em ambientes industriais e marinhos, a resistência à corrosão se torna empobrecida (COUTINHO, 1992). Em termos de comportamento mecânico, a

tenacidade é considerada de média a baixa e a conformabilidade é também classificada como relativamente reduzida, certamente em virtude de sua baixa capacidade de encruamento (KRAUSS, 1990). Nota-se que as propriedades mencionadas irão variar de acordo com a composição química do material e eventuais processos realizados. Neste caso, podem ser citadas, por exemplo, operações de tratamentos térmicos nos quais fases intermetálicas frágeis podem ser formadas, como sigma e chi, diminuindo a tenacidade do metal.

Tabela 3.1 – Especificação técnica (% em peso) de alguns aços inoxidáveis ferríticos (CHIAVERINI, 2005).

aço	elementos (% em peso)					
	C	Cr	Mn	Si	P	outro
AISI 430	0,12 máx.	16,0-18,0	1,25 máx.	1,0 máx.	0,06 máx.	0,6 máx. Mo
AISI 409	0,08 máx.	10,5-11,8	1,0 máx.	1,0 máx.	0,045máx.	0,75 máx. Ti
AISI 446	0,20 máx.	23,0-27,0	1,5 máx.	1,0 máx.	0,04 máx.	0,75 máx. Ni

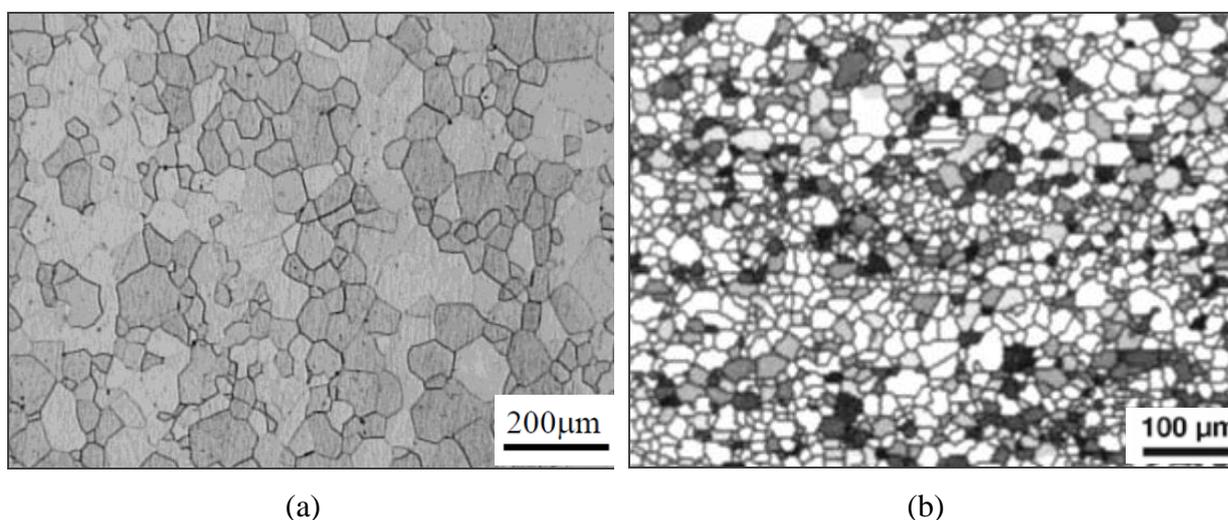


Figura 3.4 – Fotomicrografias de aços inoxidáveis ferríticos: (a) aço AISI 409 e (b) aço AISI 430 (LOPES, 2009; DURAND-CHARRE, 2004).

Os aços inoxidáveis martensíticos são ligas metálicas ferrosas com teores de cromo variando entre 12% e 17% e de carbono, em geral, superior a 0,1%, podendo chegar a 1,0%

(COUTINHO, 1992). As ligas comerciais são usualmente classificadas como de baixo, médio e alto carbono, como, por exemplo, os aços AISI 410, AISI 420 e AISI 440A, respectivamente. Na Tabela 3.2 podem ser observadas as especificações técnicas em termos de composição para as ligas mencionadas (CHIAVERINI, 2005).

Tabela 3.2 – Especificação técnica (% em peso) de alguns aços inoxidáveis martensíticos (CHIAVERINI, 2005).

aço	elementos (% em peso)				
	C	Cr	Mn	Si	Mo
AISI 410	0,15 máx.	11,5-13,5	1,0 máx.	1,0 máx.	---
AISI 420	0,15 mín.	12,0-14,0	1,0 máx.	1,0 máx.	---
AISI 440A	0,6-0,75	16,0-18,0	1,0 máx.	1,0 máx.	0,75 máx.

Em contraste com os aços inoxidáveis ferríticos, os aços martensíticos são passíveis de endurecimento através do tratamento térmico de têmpera, em virtude de ter sua quantidade de cromo determinada de tal forma que, apesar do material manter as características essenciais para ser classificado como inoxidável, pode exibir no aquecimento transformação completa para a fase austenítica. Dessa forma, esses aços podem ser empregados em situações nas quais, além de resistência à corrosão, resistência mecânica, dureza e resistência ao desgaste são propriedades requeridas (KRAUSS, 1990). Por outro lado, não são ligas recomendadas para aplicações criogênicas, uma vez que as temperaturas de transição dúctil-frágil dos mesmos são relativamente altas, podendo ser inclusive superiores à temperatura ambiente (SILVA & MEI, 2010).

Na Figura 3.5 são exibidas imagens da microestrutura dos aços inoxidáveis martensíticos AISI 410 e AISI 420, ambos tratados termicamente por têmpera seguida de revenimento (ASM HANDBOOK, 2004). Observa-se que para as duas ligas a microestrutura predominante é a martensita revenida.

Os aços inoxidáveis austeníticos são considerados os mais comuns dentre essas ligas metálicas (COLPAERT, 2008; SILVA & MEI, 2010), representando cerca de 2/3 da produção

mundial (PADILHA & RIOS, 2002). Em termos de composição química exibem como principal característica, além do cromo, a presença de níquel, podendo conter ainda outros elementos, como manganês, molibdênio e nióbio. O níquel é classificado como um elemento gamagêneo, conferindo a estabilidade da fase austenítica à temperatura ambiente. Para as ligas comerciais, o cromo pode variar de 16% a 26% e o níquel de 6 a 22%, sendo que os teores médios são 18% e 8%, respectivamente (CHIAVERINI, 2005).

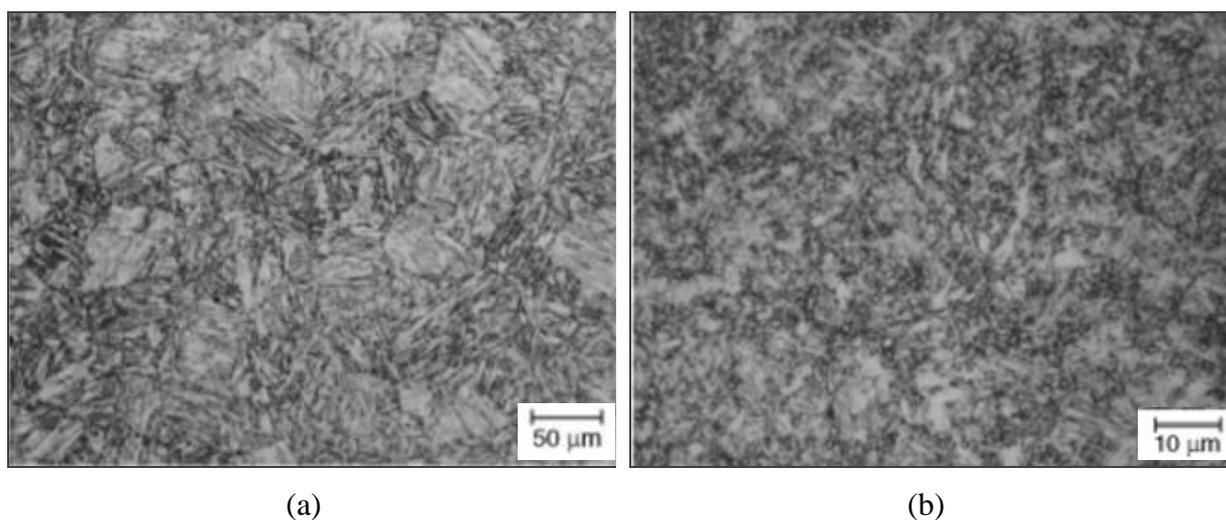


Figura 3.5 – Fotomicrografias de aços inoxidáveis martensíticos temperados e revenidos: (a) aço AISI 410 e (b) aço AISI 420 (ASM HANDBOOK, 2004).

Na Figura 3.6 podem ser observadas as principais ligas comerciais de aços inoxidáveis austeníticos, desenvolvidas a partir do aço AISI 304, acompanhadas das modificações na composição química e dos objetivos (PADILHA & GUEDES, 1994). Nota-se que a maioria das alterações foi conduzida no sentido de diminuir a sensitização, ou seja, a formação de carbonetos de cromo, e algumas para melhorar as propriedades mecânicas do material.

Considerando o comportamento mecânico, de maneira geral, as ligas austeníticas apresentam alta plasticidade e grande capacidade de encruamento, possibilitando, dessa forma, sua utilização na fabricação de peças ou componentes metálicos nos quais é necessária a realização de deformação plástica relativamente severa ou que exibam certo nível de detalhes (SILVA & MEI, 2010). Ainda no âmbito das propriedades mecânicas, esses aços podem ser

empregados em aplicações criogênicas, por não apresentarem comportamento típico de transição dúctil-frágil, e a altas temperaturas, devido à manutenção de resistência a quente.

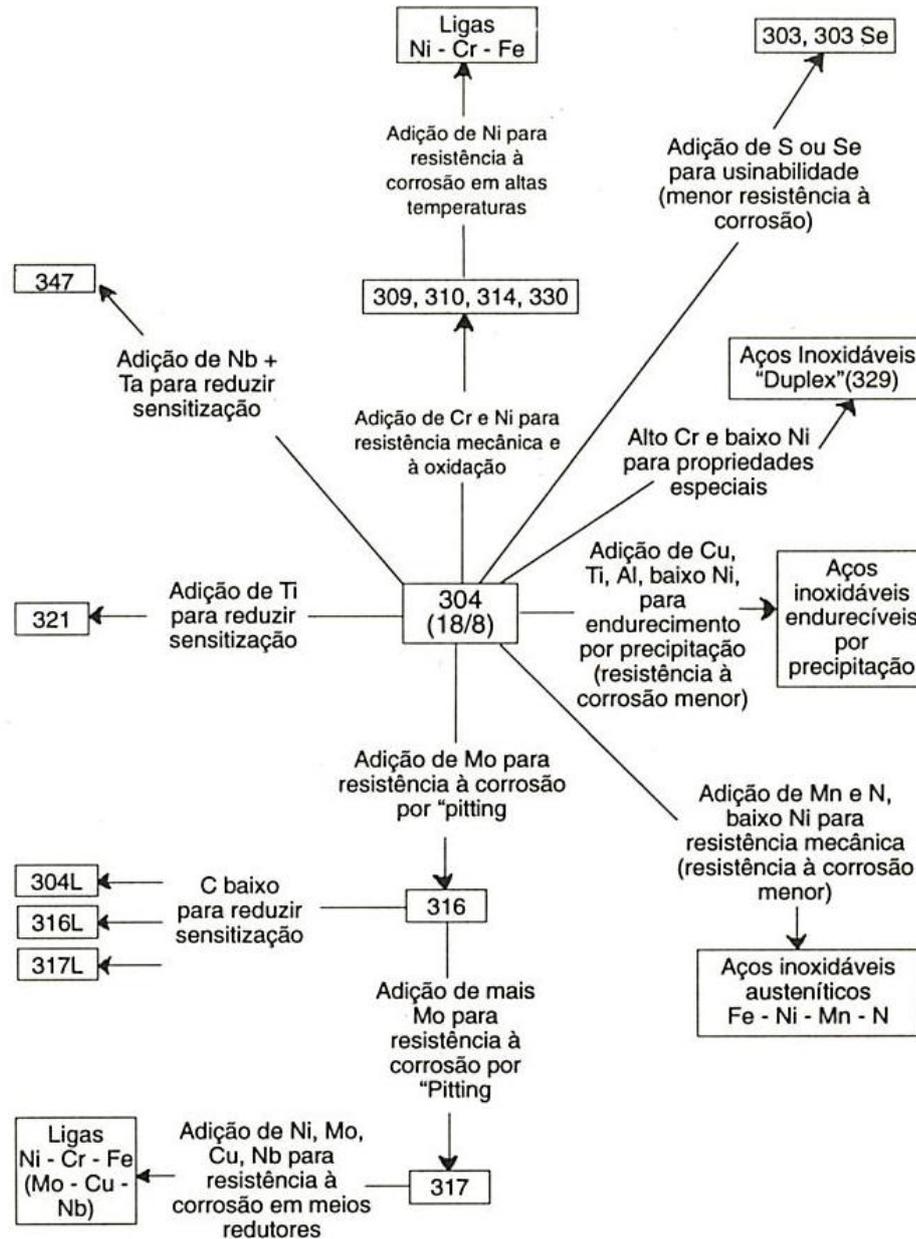


Figura 3.6 – Principais tipos de aços inoxidáveis austeníticos comerciais (PADILHA & GUEDES, 1994).

A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos é classificada como muito boa e, em geral, aumenta com o teor de cromo e de molibdênio. Para situações específicas, a

presença de determinados elementos é considerada mais relevante como, por exemplo, no caso de corrosão sob tensão, onde além do próprio molibdênio, o níquel exerce um papel fundamental (SILVA & MEI, 2010).

Na Figura 3.7 são exibidas fotomicrografias de dois aços inoxidáveis austeníticos, os aços AISI 304 e AISI 317L, após solubilização e resfriamento (COLPAERT, 2008). As imagens mostram microestruturas típicas dessas ligas, compostas por grãos equiaxiais de austenita e maclas de tratamento térmico.

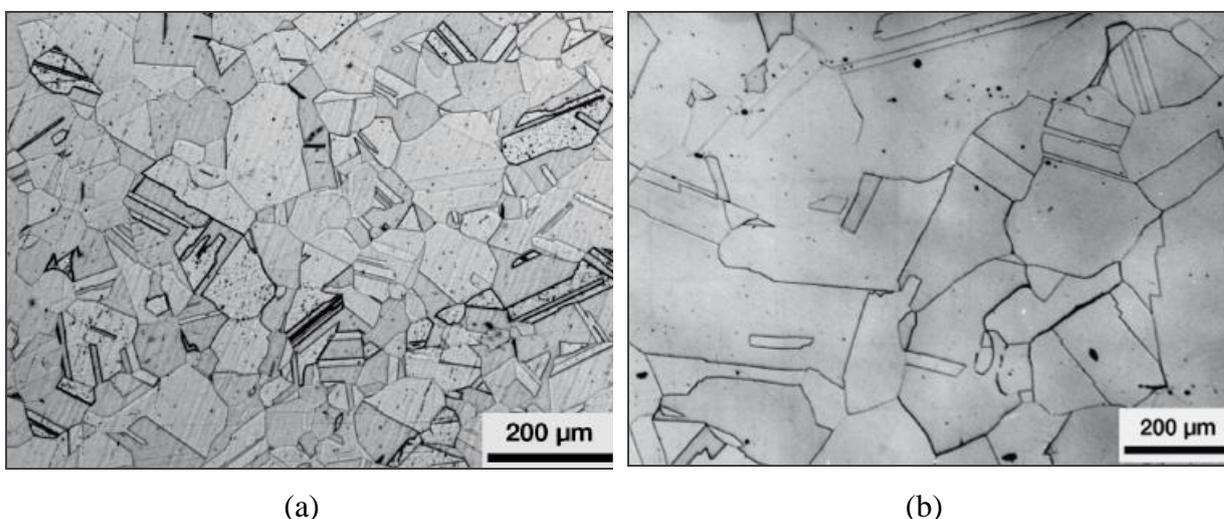


Figura 3.7 – Fotomicrografias de aços inoxidáveis austeníticos forjados e solubilizados: (a) aço AISI 304 e (b) aço AISI 317L (COLPAERT, 2008).

Em ligas metálicas em geral, a ocorrência de deformação plástica a frio envolve a formação de defeitos cristalinos, como imperfeições puntiformes, discordâncias e falhas de empilhamento. A magnitude destas discontinuidades irá depender de diversos fatores, tais como as fases presentes, a microestrutura, a taxa de deformação, dentre outros. No caso dos aços inoxidáveis austeníticos, além das alterações mencionadas, pode ser associado ainda ao processamento a frio do metal o fenômeno de transformação martensítica por deformação plástica. Esse fenômeno é caracterizado, no sistema Fe-Cr-Ni, pelo desenvolvimento das martensitas α' (estrutura cristalina cúbica de corpo centrado CCC, ferromagnética) e ϵ (estrutura cristalina hexagonal compacta HCP, paramagnética) (PADILHA & GUEDES, 1994). O mecanismo exato de formação de ambas, especialmente de α' , é ainda controverso,

com trabalhos sugerindo tanto desenvolvimento independente como a sequência de formação $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$ (PADILHA & RIOS, 2002). Em termos de localização, por outro lado, observa-se que a martensita α' surge preferencialmente nas interseções entre as placas de ε com contornos de maclas e grãos. A ocorrência e extensão dessas transformações adifusionais irão depender de diferentes parâmetros, como tipo e quantidade de deformação, temperatura de processamento e tamanho de grão, além das características específicas ou composição química de cada liga.

Dentro deste contexto, os aços inoxidáveis austeníticos podem ser divididos em duas classes: estáveis e metaestáveis (SILVA & MEI, 2010). Os primeiros são aqueles que apresentam como tendência a retenção da estrutura austenítica mesmo após a deformação plástica a frio. Já as ligas metaestáveis exibem com certa facilidade o fenômeno anteriormente mencionado. Na Figura 3.8 pode ser observada, como exemplo, a curva tensão - deformação do aço inoxidável AISI 301 obtida em um ensaio de tração conduzido à temperatura ambiente (SILVA & MEI, 2010). Nota-se que, neste caso, o material apresenta características mais próximas de uma liga metaestável, uma vez que sua taxa de encruamento pode ser considerada acentuada, similarmente ao que é observado para ductilidade.

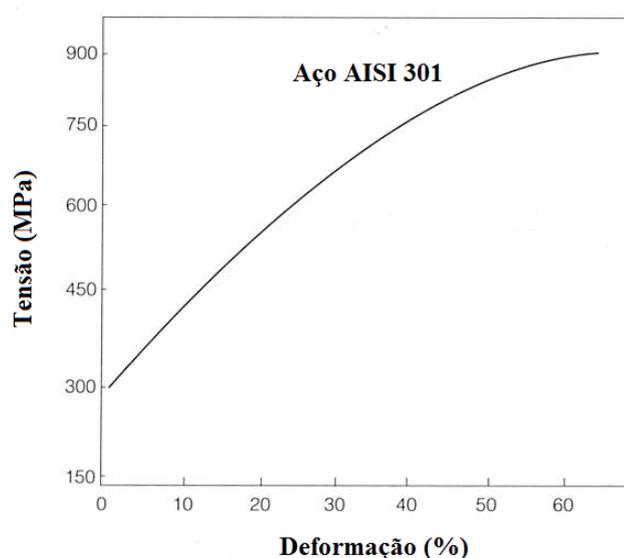


Figura 3.8 – Curva tensão – deformação obtida em um ensaio de tração conduzido à temperatura ambiente do aço inoxidável austenítico AISI 301 (SILVA & MEI, 2010).

Ainda em relação à ocorrência de transformação martensítica por deformação plástica, na Figura 3.9 são mostrados resultados relativos a um trabalho desenvolvido no aço inoxidável AISI 304 (DE et al., 2004). Amostras da liga mencionada foram levadas a ensaios de tração à temperatura de -50°C até diferentes magnitudes de deformação plástica e posteriormente avaliadas através de difração de raios-X e ensaios metalográficos (microscopia óptica). Verificou-se que, neste caso, o teor de martensita ϵ aumentou com a deformação até um nível de cerca de 10% e, em seguida, decresceu até atingir praticamente zero para uma deformação de 40%. Por outro lado, a quantidade de martensita α' aumentou continuamente, atingindo um volume % superior a 70%.

Os aços inoxidáveis duplex são caracterizados pela apresentação de estrutura bifásica ferrítica-austenítica (dessa forma também denominados austenoferríticos), levando a uma combinação favorável das propriedades dos aços inoxidáveis homônimos, tais como boas resistência à corrosão e tenacidade e elevada resistência mecânica. Estas ligas representam atualmente uma importante classe de materiais, estando em expansão, e têm sido amplamente empregadas em diversos setores como, por exemplo, nas indústrias química, petroquímica e nuclear (MICHALSKA & SOZANSKA, 2006).

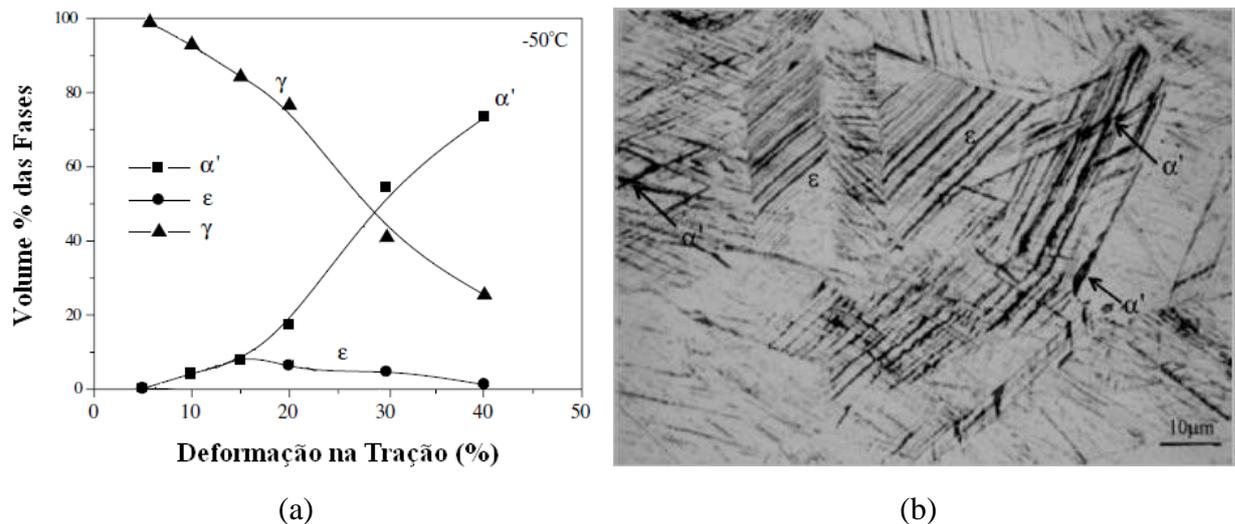


Figura 3.9 – Efeito da magnitude da deformação por tração na transformação martensítica por deformação plástica do aço inoxidável AISI 304: (a) volume % das fases em função da deformação e (b) fotomicrografia do material após deformação de 10% (DE et al., 2004).

Em termos de composição química, os aços inoxidáveis duplex apresentam teores de cromo e níquel variando entre 17% e 30% e 3% e 13%, respectivamente (KRAUSS, 1990). As principais ligas são mostradas na Figura 3.10, assim como suas vantagens em relação à resistência à corrosão (SILVA & MEI, 2010). Dentre os quatro materiais exibidos, todos considerados comerciais, destaca-se o aço 2205 ou UNS 31803 (0,03%C máximo; 21,00%-23,00%Cr; 4,50%-6,50%Ni; 2,50%-3,50%Mo; 0,10%-0,22%N), mais empregado hoje na indústria, correspondendo a cerca de 80% da produção mundial de aços inoxidáveis austenoferríticos.



Figura 3.10 – Principais tipos de aços inoxidáveis duplex comerciais (SILVA & MEI, 2010).

Na Figura 3.11 são mostradas, como exemplos, imagens obtidas através de microscopia óptica dos aços inoxidáveis 2205 (UNS 31803) e 2507 (UNS 32750), ambos solubilizados e resfriados bruscamente em água (ASM HANDBOOK, 2004; COLPAERT, 2008). Observa-se a presença de grãos austeníticos (γ) e grãos ferríticos (α), ainda com morfologia alongada, certamente em função do processo de fabricação prévio.

Apesar das vantagens em comparação com outros grupos de aços inoxidáveis, já brevemente citadas, uma série de limitações técnicas é observada nos aços austenoferríticos,

especialmente considerando ciclos térmicos ou processamento termomecânico durante eventuais operações de fabricação. Essas limitações estão associadas à possibilidade de desenvolvimento de fases secundárias, que levariam à depreciação das propriedades, como redução na resistência à corrosão e na tenacidade (FARGAS et al., 2009). Dentre essas fases secundárias, podem ser mencionados carbonetos, nitretos e compostos intermetálicos, como as fases sigma σ , chi χ , R, G, pi π e tau. Na Figura 3.12 pode ser observada uma representação esquemática de curvas tempo temperatura transformação dos possíveis precipitados em aços inoxidáveis duplex, assim como os efeitos dos elementos de liga sobre os mesmos (COLPAERT, 2008).

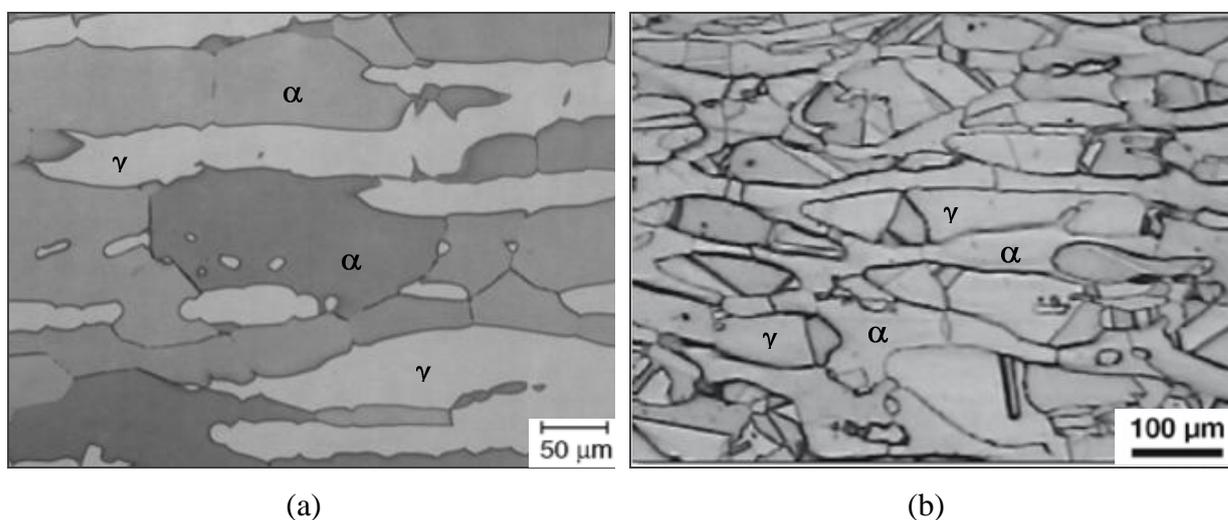


Figura 3.11 – Fotomicrografias de aços inoxidáveis austenoferríticos: (a) aço UNS S 32205 solubilizado e (b) aço UNS 32750 solubilizado e resfriado em água (ASM HANDBOOK, 2004; COLPAERT, 2008).

Nas Figuras 3.13 e 3.14 são exibidas, como exemplos, fotomicrografias obtidas através de microscopia eletrônica de varredura de amostras do aço UNS 31803 tratado termicamente com aquecimento a temperaturas de 750°C e 900°C, tempo de encharque de 60 minutos e resfriamento brusco, em água (ESCRIBA et al., 2009; LEE et al., 1999). Em ambas as condições de processamento pode ser observado o desenvolvimento das fases usuais, ferrita e austenita, e de fases secundárias. No caso da menor temperatura investigada, a ocorrência das fases sigma e chi é verificada. Já para a temperatura mais elevada, fase sigma e carbonetos foram formados. Nota-se também que essas estruturas secundárias tendem a nuclear nas

fronteiras das fases ferrita e austenita, com desenvolvimento das mesmas em detrimento da primeira.

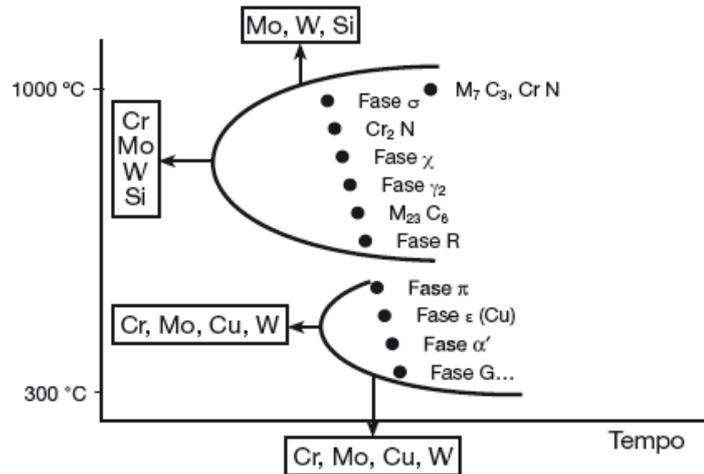
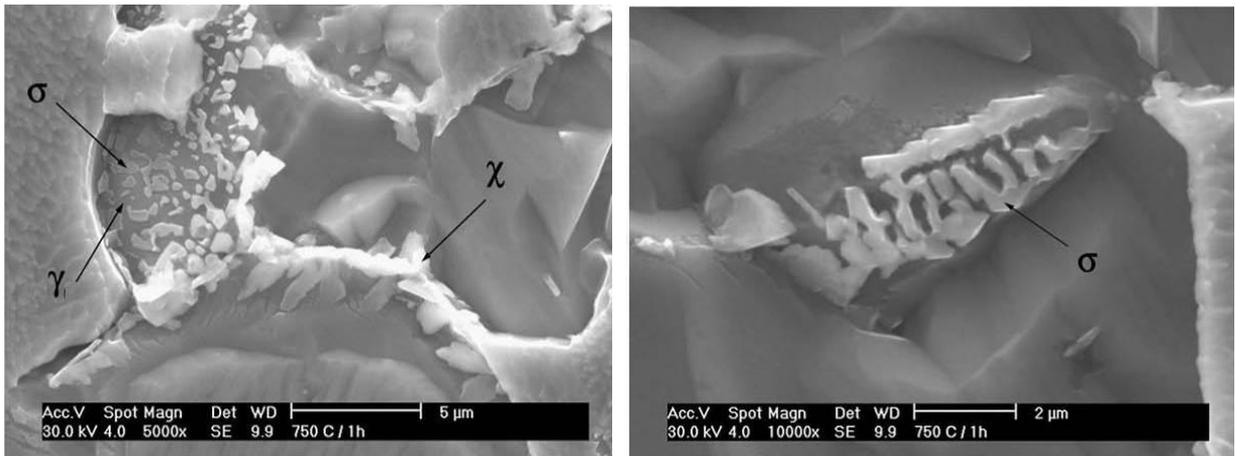


Figura 3.12 – Representação esquemática de curvas tempo - temperatura - transformação dos possíveis precipitados, como carbonetos e fases intermetálicas, em aços inoxidáveis duplex, assim como os efeitos dos elementos de liga sobre os mesmos (COLPAERT, 2008).



(a)

(b)

Figura 3.13 – Fotomicrografias do aço inoxidável UNS 31803 tratado termicamente a 750°C por 60 minutos e resfriado em água evidenciando a presença das fases intermetálicas sigma σ e chi χ : (a) e (b) regiões da amostra e ampliações distintas (ESCRIBA et al., 2009).

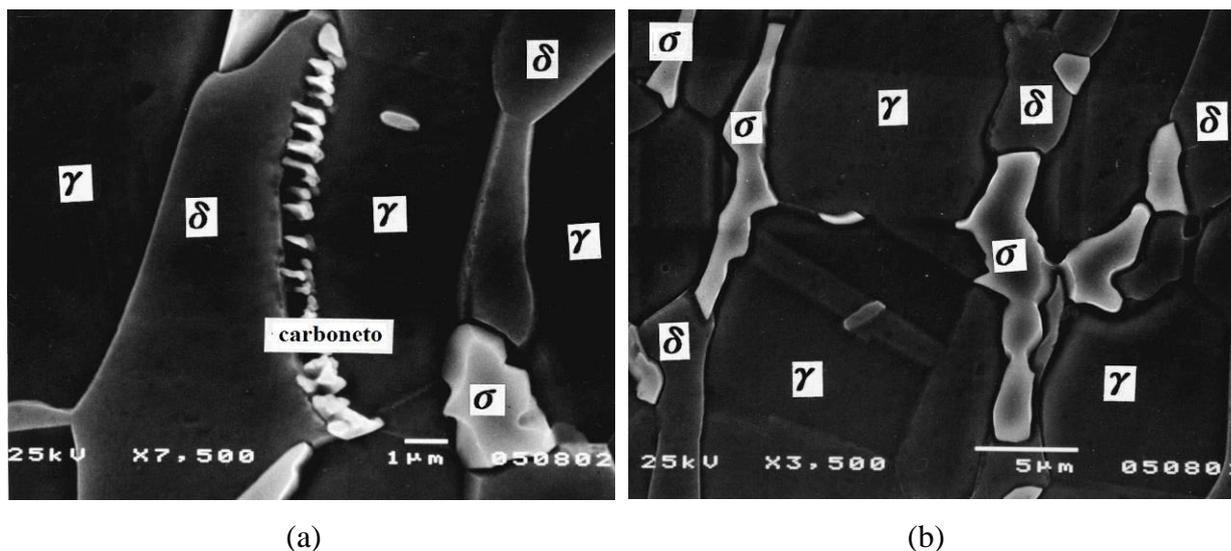


Figura 3.14 – Fotomicrografias do aço inoxidável UNS 31803 tratado termicamente a 900°C por 60 minutos e resfriado em água evidenciando a presença de carbonetos e da fase intermetálica sigma σ : (a) e (b) regiões da amostra e ampliações distintas (LEE et al., 1999).

3.2. Dobramento de Chapas Metálicas

3.2.1. Características gerais do dobramento de chapas

O termo conformação mecânica compreende uma série de operações responsáveis pela combinação de esforços mecânicos com o objetivo de alterar a forma e as dimensões de um corpo com a manutenção de seu volume. Essa alteração se dá através da ocorrência de deformação plástica, que pode ainda levar a modificações estruturais no metal e, conseqüentemente, em suas propriedades mecânicas.

Dentre os diversos tipos de operações de conformação, destacam-se os processos de estampagem, caracterizados pela versatilidade das formas possíveis de serem obtidas, pela produtividade elevada, pelo tempo reduzido de processamento, pelo controle dimensional simplificado e pelo consumo relativamente baixo de energia quando comparado a outras operações envolvendo deformação plástica (DIETER, 1981; BRESCIANI FILHO et al., 2011).

A matéria-prima de uma operação de estampagem é a chapa, produto plano oriundo de outra operação de conformação mecânica, a laminação. Esta chapa é inicialmente submetida à primeira etapa de processamento, o corte, com uso de guilhotinas ou prensas, que possibilitam a obtenção de um disco ou de um esboço (chapa cortada com forma variada), ambos denominados blanques. Em seguida, o material cortado pode ser usado em diferentes tipos de operações de estampagem em função das características do produto. Na Figura 3.15 é exibida, como exemplo, a representação esquemática de uma operação de embutimento profundo de um cilindro, onde podem ser observados a chapa, a matriz, o sujeitador ou anel de fixação e o punção (MARCINIAK et al., 2002).

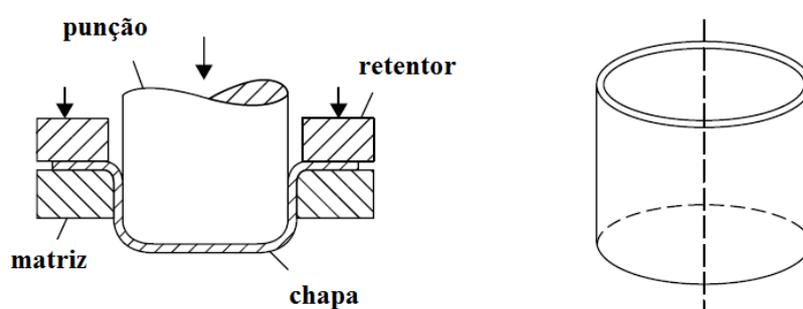


Figura 3.15 – Representação esquemática de uma operação de embutimento profundo de um cilindro (MARCINIAK et al., 2002).

Uma das formas mais usuais de classificar os processos de estampagem é considerando as operações exemplificadas na Figura 3.16: dobramento, cisalhamento, estiramento e embutimento profundo (DIETER, 1981).

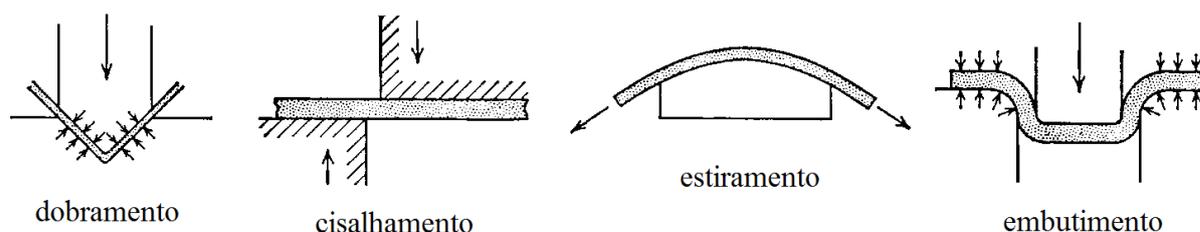


Figura 3.16 – Operações mais usuais associadas à estampagem (DIETER, 1981).

Dentre os processos citados anteriormente, o dobramento é o tipo mais comum de operação de estampagem de chapas, sendo uma etapa isolada de processamento do material ou uma das etapas de deformação plástica em outros processos de conformação mecânica. Nesta operação, segmentos retos do corpo plano (chapa) são transformados em curvos com o auxílio de ferramentas (DIETER, 1981).

Na Figura 3.17 é exibida uma representação esquemática de uma chapa dobrada com algumas das características mais importantes. Observa-se que na região interna da peça estão atuando esforços de compressão e na região externa esforços de tração. Ao longo de uma linha perpendicular à chapa há um ponto no qual as tensões são nulas, o chamado ponto neutro. A linha de união de todos os pontos neutros, considerando um corte feito pelo plano transversal da peça, é denominada linha neutra (BRESCIANI FILHO et al., 2011). Essa linha neutra se aproxima da superfície interna da chapa durante a execução da operação de dobramento e observa-se que a deformação plástica das fibras da superfície externa é maior do que a sofrida pelas fibras internas (DIETER, 1981).

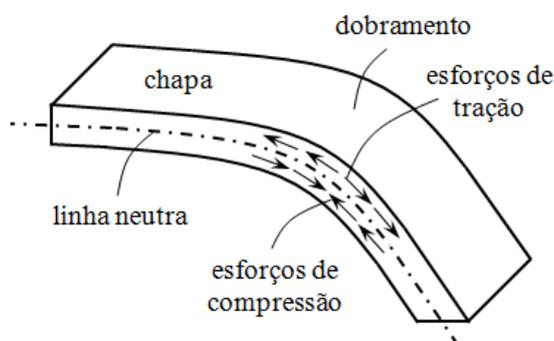


Figura 3.17 – Representação dos esforços atuantes e da linha neutra no dobramento.

Ainda em relação às características fundamentais do processo, na Figura 3.18 podem ser verificados o raio de dobramento R , que é definido como o raio de curvatura da superfície côncava ou interna da operação, e o ângulo de dobramento α , que pode ser medido entre a superfície externa da chapa de um lado do dobramento e a superfície externa do outro lado (ASM HANDBOOK, 2000; GARCIA et al., 2000). Por fim, na representação da Figura 3.18, b e t são a largura e a espessura da chapa, respectivamente.

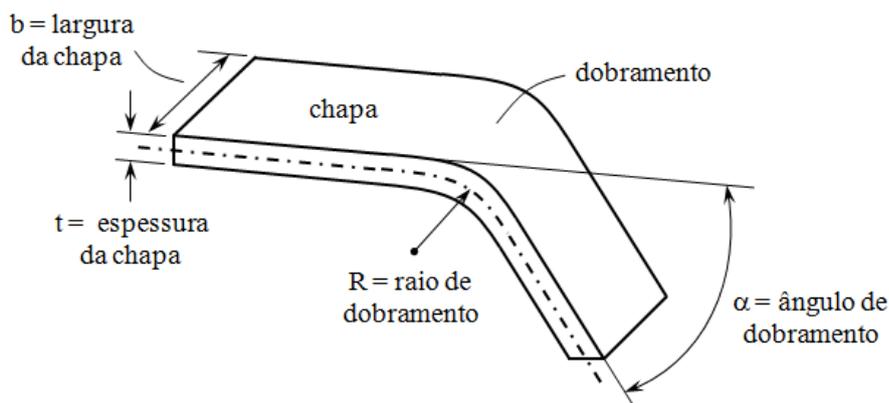


Figura 3.18 – Representação do dobramento de uma chapa com suas características geométricas (ASM HANDBOOK, 2000; GARCIA et al., 2000).

Considerando os últimos parâmetros geométricos do processo mencionados anteriormente, ressalta-se que a espessura da chapa é alterada à medida que a mesma é deformada plasticamente por dobramento. Neste caso, verifica-se que, quanto menor o raio da operação, maior será a diminuição da espessura da chapa e a deformação plástica e (deformação convencional) sofrida pelo material, conforme a Equação (3.3) (DIETER, 1981). Resultados experimentais, entretanto, mostram que para situações nas quais a relação entre a espessura e o raio é relativamente elevada, a deformação na superfície externa do componente é maior do que a determinada através da Equação (3.3), fenômeno que não ocorreria para a região interna da peça dobrada.

$$e = \frac{1}{(2R/t) + 1} \quad (3.3)$$

O estado de tensões desenvolvido na chapa durante o dobramento pode ainda promover a ocorrência de fissuramento na superfície externa da peça quando as tensões de tração atuantes nesta região superam a tensão limite de resistência do material e enrugamento na parte interna da mesma devido à ação dos esforços de compressão, com incidência maior em chapas com espessura reduzida (BRESCIANI FILHO et al., 2011). De forma a evitar a ocorrência de trincas no metal, costuma-se trabalhar com um raio mínimo de dobramento, que atua como

uma espécie de limite de conformação, variando de acordo com as características estruturais do material e com seu estado de deformação prévio (DIETER, 1981). Dentro deste contexto, a seguir são apresentadas as Equações (3.4) e (3.5) para a determinação do raio mínimo de dobramento R_{min} a partir da redução de área q obtida em ensaios de tração do metal. Nota-se que são exibidas duas expressões: a primeira está associada a materiais para os quais o valor de q é inferior a 0,2 e a segunda para o oposto.

$$\frac{R_{min}}{t} = \frac{1}{2q} - 1 \quad (3.4)$$

$$\frac{R_{min}}{t} = \frac{(1 - q)^2}{2q - q^2} \quad (3.5)$$

Destacando ainda o estado de tensões presente na superfície da chapa, as direções das tensões e das deformações principais desenvolvidas durante o dobramento são exibidas na Figura 3.19, assim como uma representação da relação entre a deformação nas fibras da superfície externa na fratura e o quociente entre a largura e a espessura da chapa (ASM HANDBOOK, 2000). Nota-se que para as situações nas quais $b / t > 8$, o dobramento ocorre no estado plano de deformação e a ductilidade na operação é independente do valor exato da relação entre a largura e a espessura do material. Por outro lado, para as situações nas quais $b / t < 8$, o dobramento ocorre no estado plano de tensões, com a deformação plástica nas três direções principais, e a ductilidade depende da relação b / t de maneira acentuada, diminuindo com o aumento da mesma. Portanto, sempre que possível, os ensaios de dobramento devem ser conduzidos em amostras com a relação b / t superior a 8, de forma a evitar os efeitos da geometria da chapa nos resultados (ASM HANDBOOK, 2000).

Por fim, em termos de processo, além da deformação e das condições essenciais de operação, deve-se considerar a determinação da força necessária à execução do dobramento de um corpo. A magnitude dessa força depende da tensão limite de escoamento à tração e da espessura, que aparecem como variáveis do material/chapa, e dos parâmetros do processo, como o raio, o ângulo e o comprimento de dobramento, sendo a mesma calculada a partir da Equação (3.6) (DIETER, 1981).

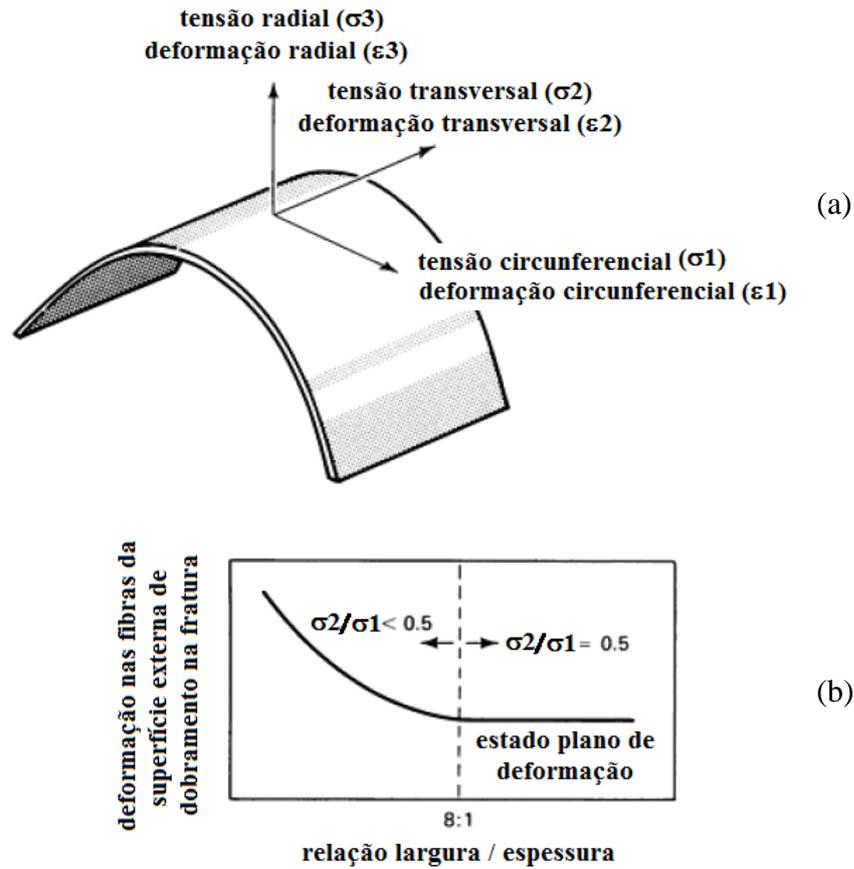


Figura 3.19 – Representação da tensão e da deformação no dobramento de chapas: (a) tensões e deformações principais e (b) relação entre a deformação nas fibras da superfície externa de dobramento na fratura e o quociente largura / espessura da chapa (ASM HANDBOOK, 2000).

$$F_d = \frac{L_E L t^2}{2(R + t/2)} \tan \frac{\alpha}{2} \quad (3.6)$$

Onde F_d é a força de dobramento, L_E é a tensão limite de escoamento determinado no ensaio de tração e L é o comprimento de dobramento.

3.2.2. Recuperação elástica no dobramento de chapas

Um dos maiores defeitos geométricos observados nos processos de conformação de chapas é a recuperação elástica do material, também conhecida como retorno elástico ou efeito mola

(ABDULLAH et al., 2012). O fenômeno é caracterizado pela variação dimensional da peça deformada depois que os esforços aplicados à ferramenta de conformação são aliviados (DIETER, 1981). Na Figura 3.20 pode ser observada, como exemplo, uma representação esquemática da recuperação elástica em um ensaio de dobramento de chapas com matriz em V (GARCIA et al., 2000). Nota-se que, após a retirada dos esforços, o raio final R_f e o ângulo final α_f de dobramento são respectivamente maior e menor do que os originais, R_i e α_i , como pode ser verificado detalhadamente na Figura 3.21 (DIETER, 1981). Essa variação dimensional observada após o processo está relacionada à energia elástica armazenada no material durante a operação de dobramento, sendo associada aos estados de tensão e de deformação desenvolvidos nesta operação de estampagem.

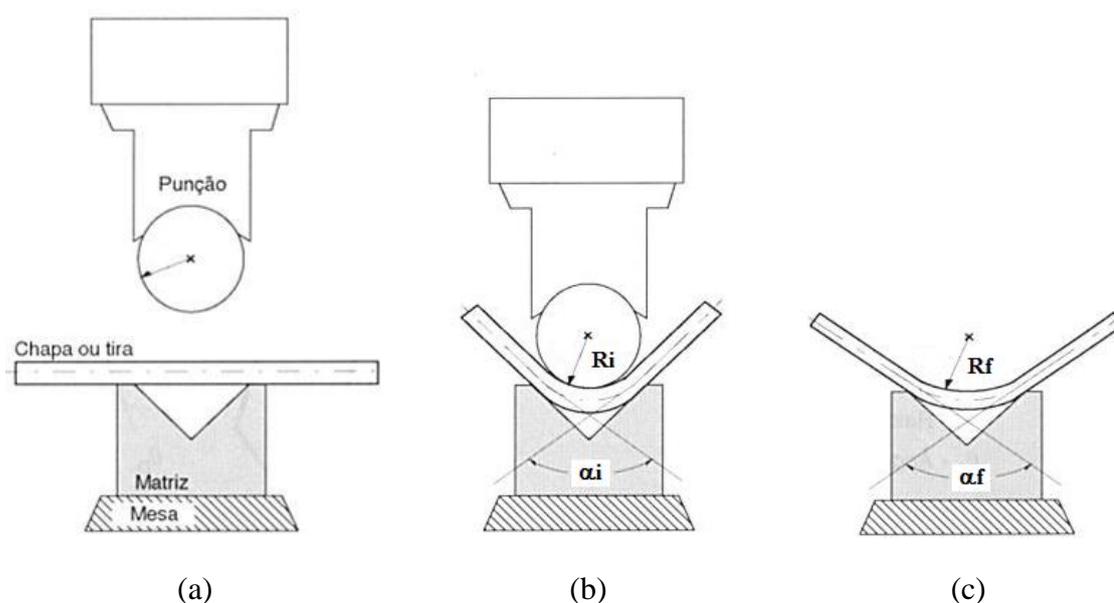


Figura 3.20 – Exemplificação do fenômeno de retorno elástico ou efeito mola em chapas durante o dobramento: (a) sem dobramento, (b) durante o dobramento e (c) após o dobramento (GARCIA et al., 2000).

Em termos das características do material, uma série de parâmetros irão influenciar a ocorrência e a magnitude do retorno elástico, como a tensão limite de escoamento, o módulo de elasticidade e a ductilidade do metal. Neste caso, a princípio, quanto maior forem o limite de escoamento e a ductilidade e menor o módulo de elasticidade, mais acentuado será o efeito mola (DIETER, 1981). Em adição aos parâmetros mencionados, aparece o expoente de

encruamento (INAMDAR et al., 2002), determinado através da aproximação da curva tensão-deformação obtida em um ensaio de tração para a equação de Hollomon (DIETER, 1981). Podem ser destacados ainda como importantes no fenômeno os seguintes aspectos associados ao material: anisotropia, encruamento prévio e efeito Bauschinger, que pode ser definido como a redução da tensão limite de escoamento observada após a aplicação de esforços sucessivos reversos, como a sequência tração-compressão (OLIVEIRA et al., 2007).

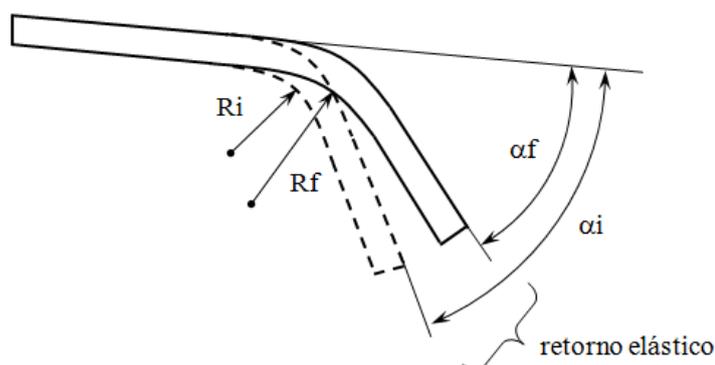


Figura 3.21 – Representação esquemática do fenômeno de retorno elástico no dobramento de uma chapa (DIETER, 1981).

Considerando os aspectos geométricos da chapa e do processo, a espessura da amostra, as dimensões da matriz e o raio de dobramento também irão afetar a recuperação elástica, que aumenta com a relação R / t , com a abertura ou distância entre as faces opostas da matriz e com o raio utilizado na operação (TEKASLAN et al., 2006; INAMDAR et al., 2002).

Por fim, há trabalhos que sugerem ainda que a força aplicada no processo e o período ou tempo no qual a mesma está atuando influenciam os resultados (TEKASLAN et al., 2006). Por outro lado, a velocidade da operação ou ensaio não seria um fator importante no dobramento, contanto que o processo não seja realizado com níveis considerados de experimentos dinâmicos (SOUZA, 1982).

Nas figuras a seguir (Figuras 3.22 e 3.23) são apresentados exemplos de trabalhos nos quais foi observada a ocorrência da recuperação elástica em materiais metálicos e os fatores de influência na mesma. Os efeitos do ângulo de dobramento, assim como as características do

material e a espessura da chapa dobrada são exemplificados na Figura 3.20 (TEKINER, 2004). Chapas de aço com baixo teor de carbono e latão com espessuras de 0,5mm e 1,0mm foram submetidas à operação de dobramento com ângulos de 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°. Nota-se que, para todas as situações, um aumento no ângulo de dobramento levou à elevação no ângulo de retorno elástico. Por outro lado, a elevação da espessura da chapa acarretou uma diminuição no fenômeno. Em termos das características do material, por fim, o latão empregado no estudo apresentou ocorrência mais acentuada do fenômeno.

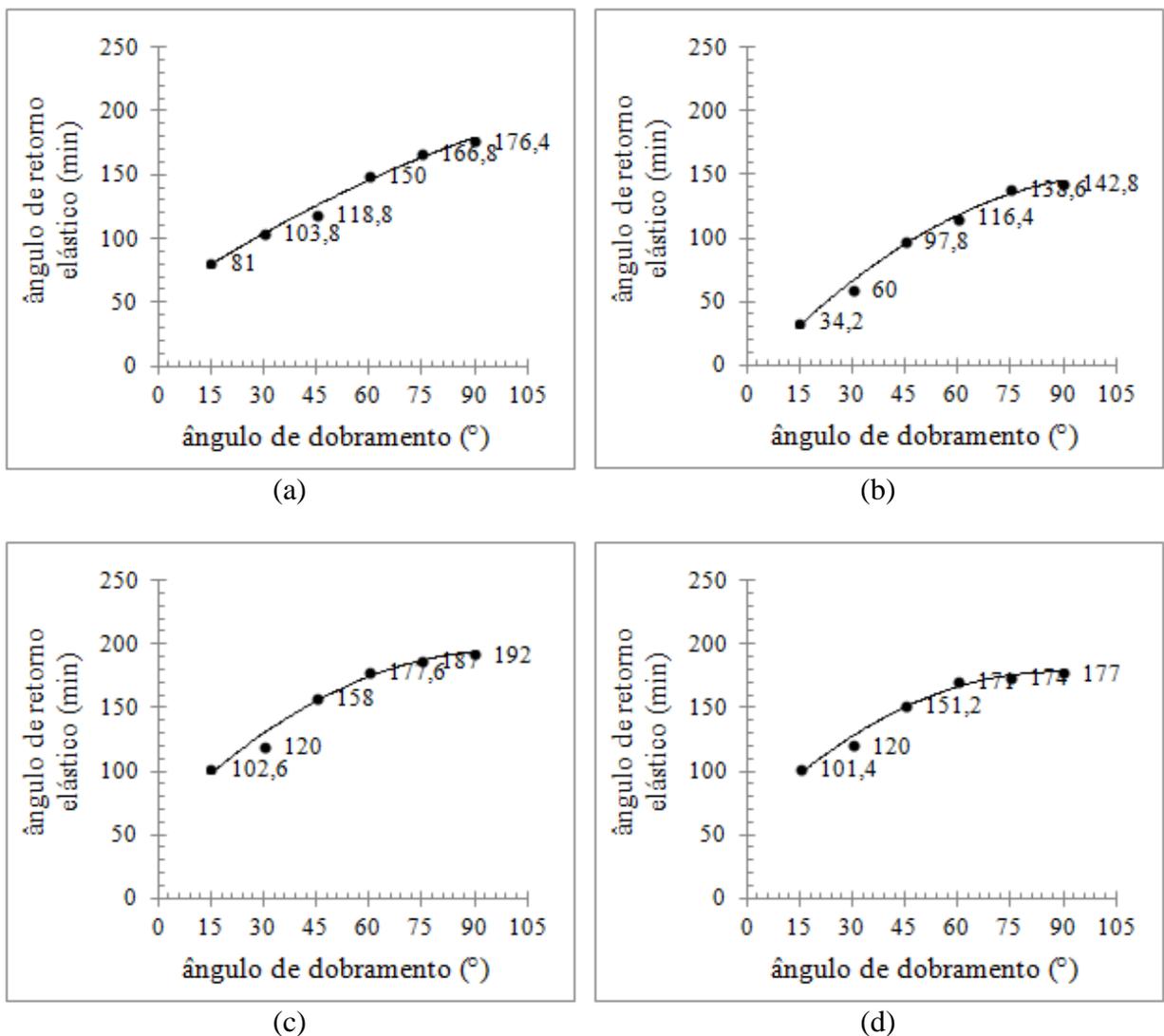


Figura 3.22 – Retorno elástico observado no dobramento de chapas metálicas – efeito do ângulo de dobramento: (a) e (b) aço baixo carbono com 0,5mm e 1mm de espessura, respectivamente; (c) e (d) latão com 0,5mm e 1mm de espessura, respectivamente (TEKINER, 2004).

Na Figura 3.23 são mostrados gráficos que exemplificam o efeito do estado inicial do material, no caso uma liga de alumínio AA5754-0 pré-deformada por tração em diferentes níveis (1%, 3%, 5%, 7%, 9% e 11%), na recuperação elástica durante o processo de dobramento posterior (TOROS et al., 2010) com ângulo de 60°. Ressalta-se que são exibidos também resultados referentes à influência da tração prévia nos parâmetros da equação de Hollomon: expoente de encruamento e coeficiente de resistência (DIETER, 1981). Observa-se que à medida que foi aumentada a magnitude da pré-deformação, o fenômeno de retorno elástico se tornou mais acentuado, passando de uma relação entre o ângulo de retorno e ângulo de dobramento inicial de 0,14 para cerca de 0,34 no caso de peças com pré-deformação de 11%. Por outro lado, tanto expoente de encruamento como o coeficiente de resistência tenderam a diminuir com a pré-deformação.

Diversos métodos foram propostos para quantificar ou avaliar a recuperação elástica dos metais no dobramento de chapas. Um método comum de análise da intensidade do retorno elástico é a determinação do índice K, no qual são empregados nos cálculos os ângulos antes e após o retorno elástico α_i e α_f ou os raios R_i e R_f nas mesmas condições, conforme a Equação 3.7 (DIETER, 1981). Outras técnicas consideram como parâmetro para estudo a relação entre o raio antes e o raio após o alívio da força de dobramento. Dentre esses métodos, alguns envolvem ainda informações relativas às características do material, como o módulo de elasticidade, o expoente de encruamento e o coeficiente de Poisson, dentre outros (DIETER, 1981; GARCIA et al., 2000). As abordagens mencionadas podem ser observadas nas Equações (3.8) a (3.10).

$$K = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{R_i + t/2}{R_f + t/2} \quad (3.7)$$

$$\frac{R_f}{R_i} = \frac{180 - \alpha_f}{180 - \alpha_i} \quad (3.8)$$

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i L_E}{E t} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i L_E}{E t} \right) + 1 \quad (3.9)$$

Onde E é o módulo de elasticidade do material determinado através do ensaio de tração.

$$\frac{R_i}{R_f} = 1 - \frac{3 k (1 - \nu^2)}{(2 + n) 0,75^{(1+n)/2}} \left(\frac{2 R_i}{t} \right)^{(1-n)} + \left[\left(\frac{2 R_i}{t} \right) \left(\frac{k}{E} \right)^{1/(1-n)} \right]^3 \quad (3.10)$$

$$\left[\frac{3 (1 - \nu^2)^{(3+n)}}{(2 + n) 0,75^{(1+n)/2} (1 - \nu + \nu^2)^{(2+n)/2}} - \frac{(1 - \nu^2)^3}{(1 - \nu + \nu^2)^{1,5}} \right]$$

Onde k é o coeficiente de resistência, n é o expoente de encruamento e ν é o coeficiente de Poisson.

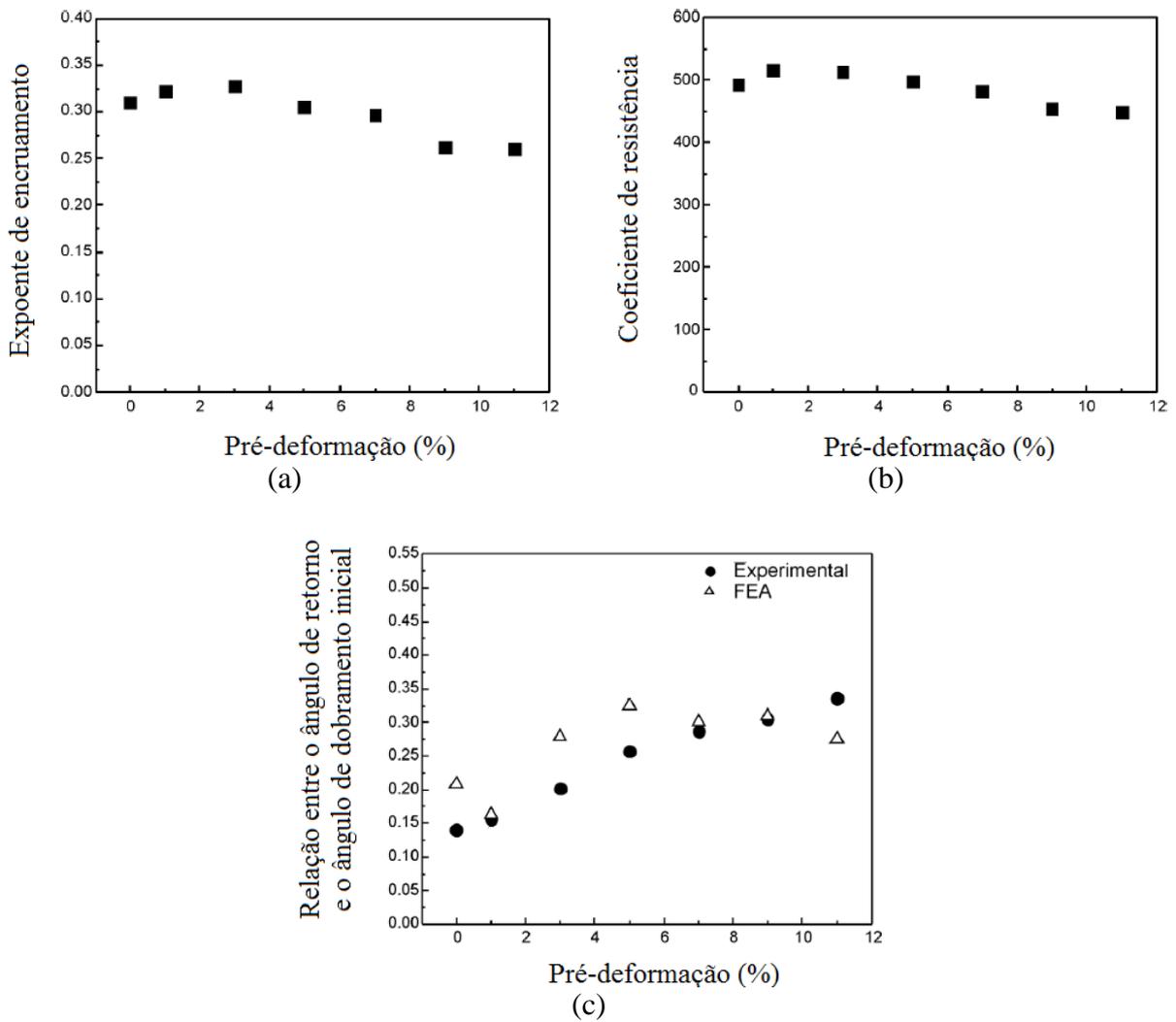


Figura 3.23 – Retorno elástico observado no dobramento de chapas de uma liga de alumínio AA5754-0: (a) e (b) efeito da pré-deformação por tração no expoente e no coeficiente de encruamento, respectivamente; (c) efeito da pré-deformação na relação entre o ângulo de retorno elástico e o ângulo inicial de dobramento (TOROS et al., 2010).

Em geral, a ocorrência de efeito mola nos materiais metálicos pode ser apenas controlada ou minimizada, uma vez que sua eliminação completa é considerada difícil (ABDULLAH et al., 2012). Para minimizar o fenômeno, em termos práticos, costuma-se trabalhar com um raio de curvatura menor do que aquele desejado, de forma que, após o alívio dos esforços, o retorno elástico faz com que o raio final seja similar ao planejado (DIETER, 1981). Em adição às possíveis alterações no raio de dobramento, conhecida a magnitude do retorno elástico, pode-se também conformar a chapa com um ângulo superior ao requerido. Além das técnicas mencionadas, que podem levar à necessidade de realização de muitos testes, uma vez que são empíricas, há outros métodos descritos na literatura. Dentre esses procedimentos, podem ser destacados: a aplicação de elevados esforços compressivos, a realização de estiramento de maneira concomitante com o dobramento e a condução da operação a temperaturas elevadas, visto que uma diminuição na tensão de escoamento leva à redução no retorno elástico (TEKINER, 2004).

3.2.3. Ensaios de dobramento de chapas

O ensaio de dobramento é uma técnica muito empregada em indústrias e laboratórios, fornecendo informações, em geral qualitativas, acerca da ductilidade de um material (SOUZA, 1982). É apontado como um ensaio de fabricação (GARCIA et al., 2000), uma vez que objetiva determinar o comportamento do metal (e, de certa forma, sua viabilidade) nos processos que envolvam a conformação mecânica de chapas, tiras e barras, entre outros.

O ensaio é conduzido com o dobramento do corpo de prova até o ângulo desejado, usualmente 90°, 120° ou 180°, e depois se examina a olho nu a zona deformada do corpo de prova, no caso, a superfície externa de dobramento. Para que as condições sejam consideradas satisfatórias, o material não deve conter imperfeições como trincas, fissuras ou fendas (SOUZA, 1982).

De maneira geral, os ensaios de dobramento são divididos em quatro grandes grupos: dobramento guiado, dobramento semi-guiado, dobramento livre e dobramento com achatamento (ASTM E290, 2009).

O dobramento guiado é caracterizado pela aplicação de esforços em um corpo de prova suspenso em dois apoios, ambos próximos às suas extremidades, que podem ser pinos, roletes ou superfícies planas (ASTM E290, 2009). A força é conduzida através do contato da peça a ser conformada com um pino, mandril, pistão ou matriz superior, realizado na região central entre os dois suportes. Para as situações nas quais não é empregada uma matriz inferior, não há aplicação direta de esforços na superfície externa do corpo de prova, oposto do que pode ocorrer quando o ensaio é realizado com o emprego de matrizes. Nas Figuras 3.24 a 3.26 são apresentadas representações esquemáticas dos três tipos básicos de ensaios de dobramento guiado: dobramento sem matriz, dobramento com matriz em V e dobramento com matriz em U (ASTM E290, 2009; SOUZA, 1982; ABDULLAH et al, 2012).

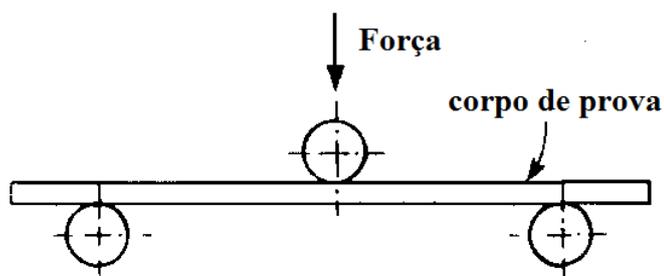


Figura 3.24 – Representação do ensaio de dobramento guiado sem o emprego de matrizes (SOUZA, 1982).

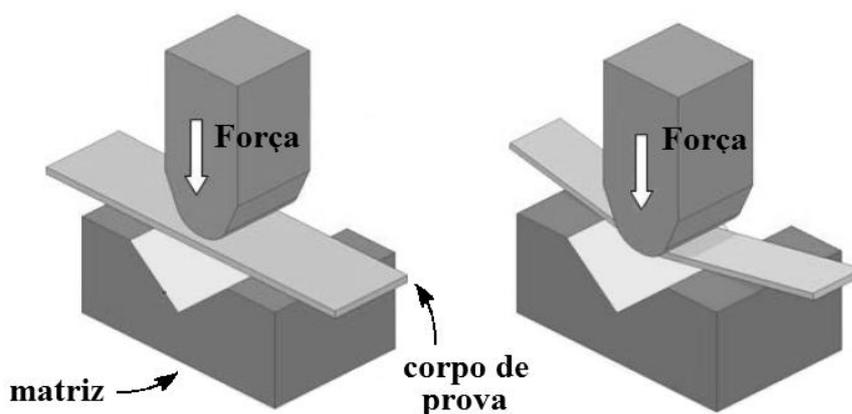


Figura 3.25 – Representação do ensaio de dobramento guiado com emprego de matriz em V (ABDULLAH et al., 2012).

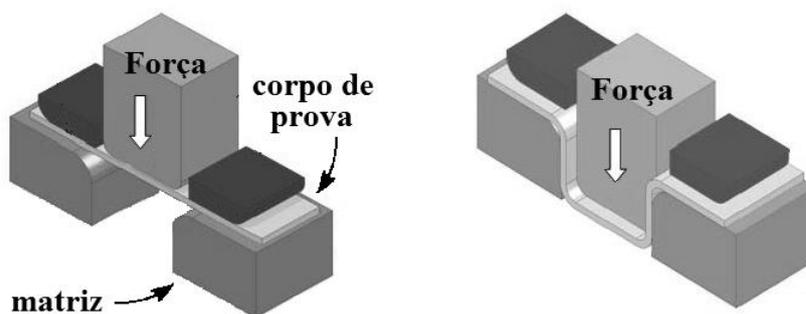


Figura 3.26 – Representação do ensaio de dobramento guiado com emprego de matriz em U (ABDULLAH et al., 2012).

O dobramento semi-guiado envolve a aplicação de força na seção transversal ao eixo mais longo do corpo de prova, na superfície da peça que, após a operação, será considerada a face externa do material (ASTM E290, 2009). Neste caso, uma das extremidades do corpo de prova é fixada ou imóvel e os esforços são aplicados na outra extremidade ou em outro local do mesmo (SOUZA, 1982). Exemplos de montagens usuais de ensaios de dobramento semi-guiado são exibidos nas Figuras 3.27 a 3.29 (SOUZA, 1982).

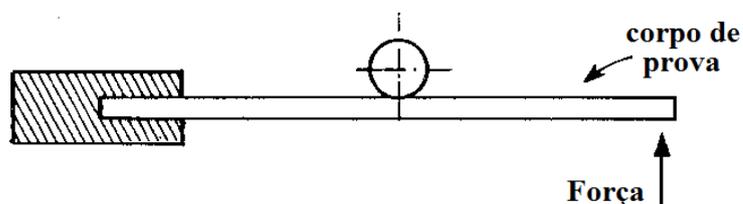


Figura 3.27 – Representação do ensaio de dobramento semi-guiado – uma extremidade do corpo de prova fixa e força aplicada na outra extremidade (SOUZA, 1982).

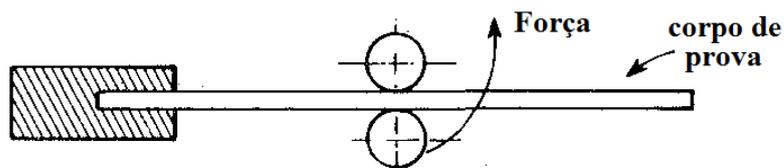


Figura 3.28 – Representação do ensaio de dobramento semi-guiado – uma extremidade do corpo de prova fixa e força aplicada na região próxima ao mandril (SOUZA, 1982).

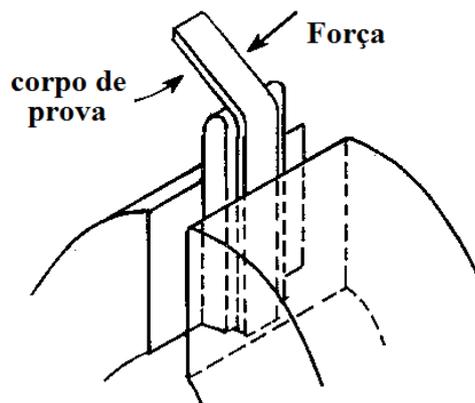


Figura 3.29 – Representação do ensaio de dobramento semi-guiado – uma extremidade do corpo de prova fixa (SOUZA, 1982).

O ensaio de dobramento livre é realizado a partir da aplicação de força nas extremidades do corpo de prova, que tendem a uma aproximação, sem o emprego de esforços externos transversalmente ao eixo mais longo da peça (ASTM E290, 2009). Neste caso, não há contato da superfície côncava do corpo de prova com nenhum outro material ou componente. Na Figura 3.30 é mostrada uma representação de montagem de ensaio de dobramento livre (SOUZA, 1982).

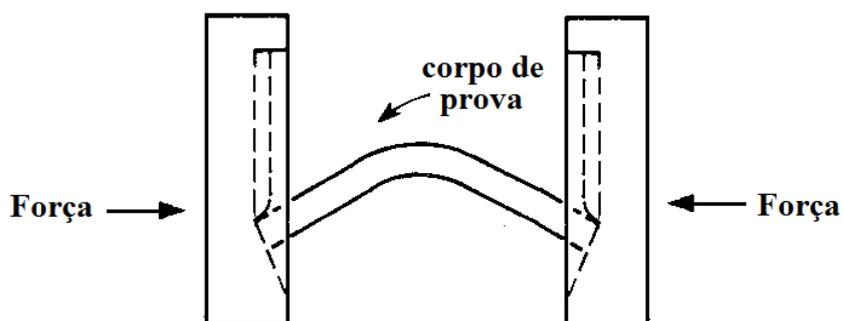


Figura 3.30 – Representação do ensaio de dobramento livre – dobramento de 180° (SOUZA, 1982).

Por fim, o ensaio de dobramento com achatamento é caracterizado pela aplicação de esforços transversais ao eixo mais longo do corpo de prova, de tal forma que as extremidades do mesmo se tornam paralelas e entram em contato uma com a outra (ASTM E290, 2009). Neste

caso, o início da operação é similar ao dobramento livre. Uma representação esquemática deste tipo de ensaio é mostrada na Figura 3.31 (ASM HANDBOOK, 2000).

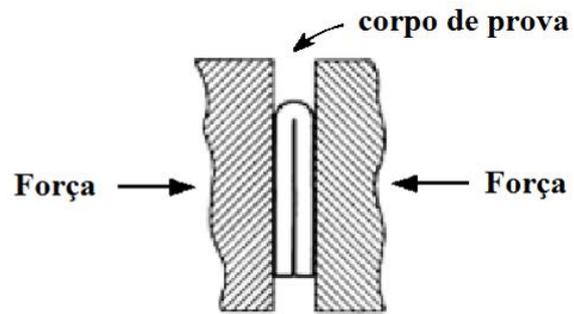


Figura 3.31 – Representação do ensaio de dobramento com achatamento (ASM HANDBOOK, 2000).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Descrição Geral do Trabalho Desenvolvido

O trabalho realizado envolveu basicamente: 1) o desenvolvimento de dispositivos para a realização de ensaios de dobramento de chapas com diferentes parâmetros geométricos, a serem acoplados em prensas; 2) a análise do processo de dobramento de chapas através da avaliação da ocorrência de eventuais trincas nas peças, 3) a análise do processo de dobramento de chapas através da avaliação do fenômeno de recuperação elástica e 4) a determinação da distribuição de deformação na seção transversal das chapas dobradas através da técnica dos perfis de microdureza. Além das abordagens mencionadas, o trabalho compreendeu ainda a análise dos efeitos das características estruturais do material em seu comportamento na operação de dobramento, através do emprego de dois aços inoxidáveis de grupos distintos, um austenítico e outro austenoferrítico, e da realização de ensaios nessas ligas no estado inicial e após tratamentos térmicos. Por fim, foram ainda conduzidas as caracterizações microestrutural e mecânica dos materiais no estado como recebido, ainda com os efeitos de seu processamento anterior, e após a realização dos tratamentos térmicos.

Nas Figuras 4.1 a 4.4 são exibidos os fluxogramas associados às etapas experimentais realizadas no trabalho. Os detalhes tanto das etapas mencionadas como das avaliações conduzidas posteriormente são apresentados nos itens a seguir.

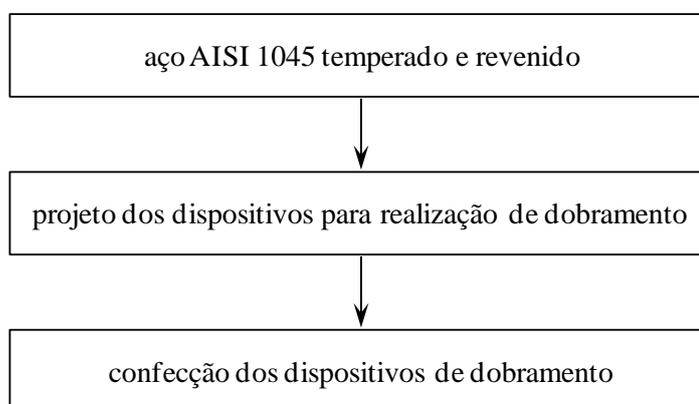


Figura 4.1 – Fluxograma relativo à etapa experimental de desenvolvimento de dispositivos para a realização de ensaios de dobramento.

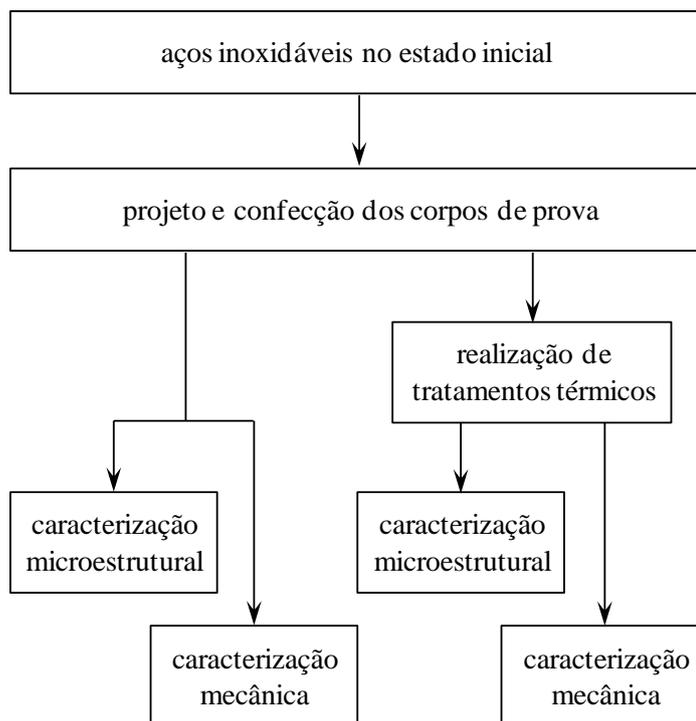


Figura 4.2 – Fluxograma relativo à etapa experimental de caracterização dos materiais no estado inicial e após os tratamentos térmicos.

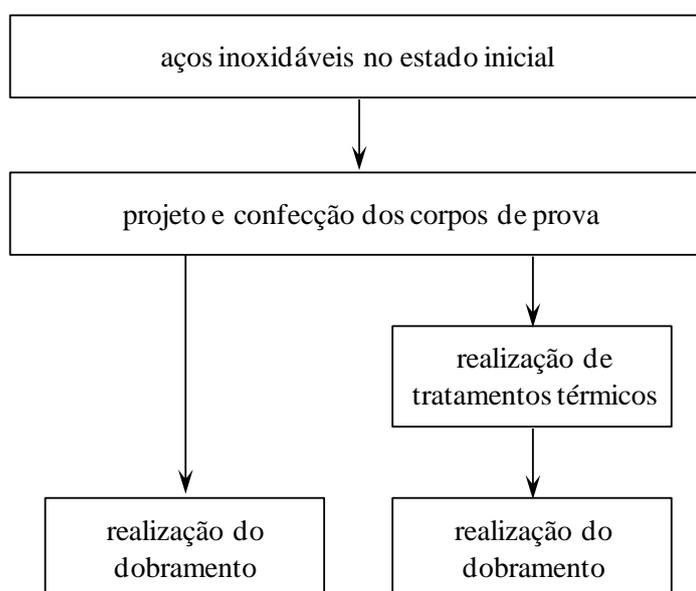


Figura 4.3 – Fluxograma relativo à etapa experimental de realização dos ensaios de dobramento.

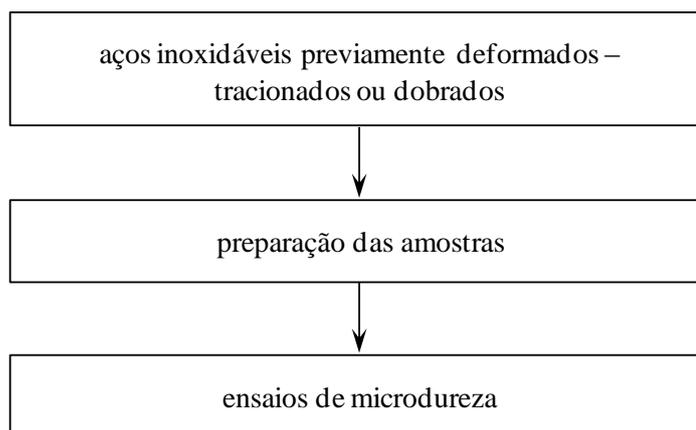


Figura 4.4 – Fluxograma relativo à etapa experimental para obtenção da distribuição de deformação dos metais após dobramento através da técnica dos perfis de microdureza.

4.2. Materiais

O presente trabalho foi realizado empregando dois materiais: o aço inoxidável austenítico AISI 304 e o aço inoxidável duplex SAF 2205. As composições químicas dos aços, fornecidas pelos fabricantes, são apresentadas nas tabelas a seguir, acompanhadas das especificações técnicas dos mesmos (Tabelas 4.1 a 4.4).

O aço inoxidável AISI 304 foi adquirido comercialmente, na forma de uma chapa com 1500mm de comprimento, 500mm de largura e 1,8mm de espessura. O aço inoxidável SAF 2205 foi doado pela empresa siderúrgica *Aperam South America*, também em forma de chapas com 1,8mm de espessura, porém com cerca de 210mm de largura e 290mm de comprimento cada peça.

Tabela 4.1 – Composição química (% em peso) do aço inoxidável AISI 304 empregado no trabalho.

elemento	C	Cr	Ni	Mn	Si
% em peso	0,068	18,78	9,35	1,73	0,33

Tabela 4.2 – Especificação técnica do aço inoxidável AISI 304 (CHIAVERINI, 2005).

elemento	C	Cr	Ni	Mn	Si
% em peso	0,08 máx.	18,00-20,00	8,00-10,50	2,00 máx.	1,00 máx.

Tabela 4.3 – Composição química (% em peso) do aço inoxidável SAF 2205 empregado no trabalho.

elemento	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
% em peso	0,026	22,67	5,32	3,02	1,85	0,37

Tabela 4.4 – Especificação técnica do aço inoxidável SAF 2205 (SILVA & MEI, 2010).

elemento	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
% em peso	0,03 máx.	21,00-23,00	4,50-6,50	2,50-3,50	---	---

4.3. Projeto e Confeção dos Dispositivos para Realização do Dobramento

Três tipos de dispositivos foram projetados e desenvolvidos para a realização da operação de dobramento: duas matrizes em V, a serem colocadas na parte inferior de uma prensa (os detalhes da mesma são fornecidos em um item a seguir), um suporte, a ser acoplado no cabeçote móvel superior do equipamento, e cinco cutelos, a serem adaptados no suporte mencionado. Ressalta-se que, além de possibilitar a realização dos experimentos da presente pesquisa, esses dispositivos foram desenvolvidos com o objetivo de permitir também a realização de trabalhos futuros.

O projeto como um todo foi conduzido considerando como variáveis as seguintes características do ensaio: ângulo de dobramento, raio de dobramento (raio do cutelo) e largura da abertura da matriz em V. Na Tabela 4.5 podem ser observados os parâmetros escolhidos para cada variável para o desenvolvimento do projeto dos dispositivos.

Tabela 4.5 – Parâmetros considerados para as variáveis do ensaio de dobramento no desenvolvimento dos dispositivos.

ângulo de dobramento	raio de dobramento	largura da abertura da matriz
30°, 60° e 90°	2mm, 4mm, 6mm, 8mm e 10mm	20mm e 40mm

Nas Figuras 4.5 e 4.6 podem ser observados o projeto/desenho de fabricação e a representação esquemática de uma das matrizes em V para os ensaios de dobramento. Nota-se que o dispositivo foi projetado de forma que pudesse ser empregado em ensaios conduzidos com os três ângulos de dobramento mencionados na Tabela 4.5. Para o caso do ângulo de 90°, foi ainda projetada uma região em V na qual o ensaio seria realizado com um raio próximo à abertura (abertura inferior no lado esquerdo das Figuras 4.5 e 4.6), diferentemente das três demais, nas quais o encontro da abertura com a superfície formaria um ângulo reto. Dessa forma, através desse dispositivo, poderão ser analisados os efeitos do ângulo de dobramento e da presença de um raio entre a superfície e a abertura da matriz, que neste caso foi de 20mm.

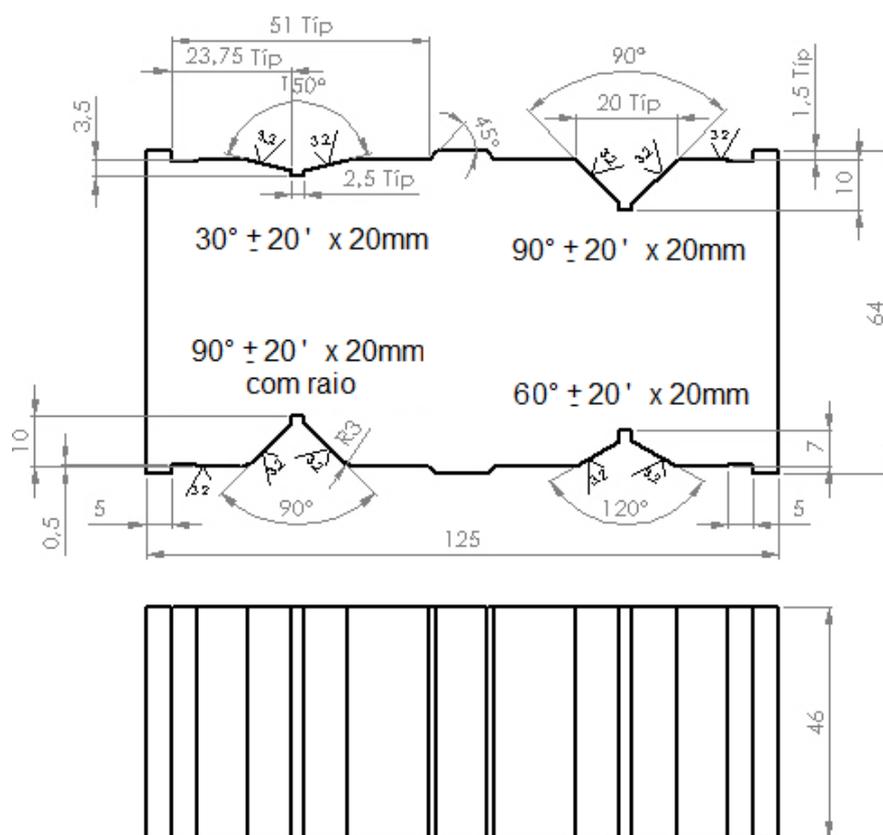


Figura 4.5 – Projeto da matriz para dobramento em V com abertura de 20mm.

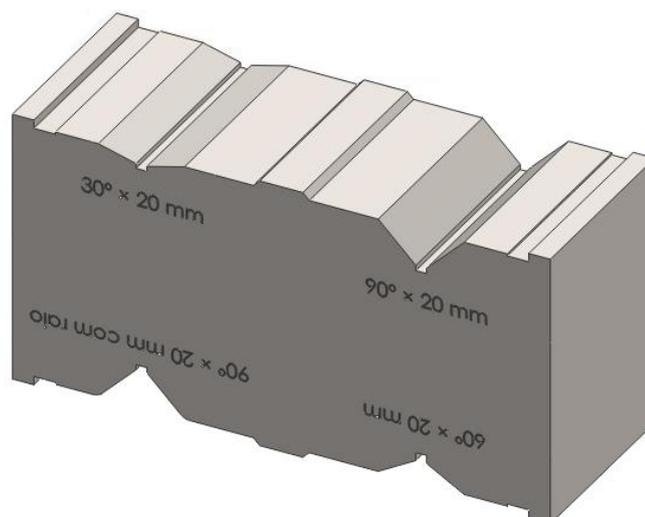


Figura 4.6 – Representação esquemática da matriz para dobramento em V com abertura de 20mm.

Nas Figuras 4.7 e 4.8 são exibidos o projeto/desenho de fabricação e a representação da segunda matriz em V para os ensaios de dobramento. Esse dispositivo é similar àquele descrito anteriormente, com exceção da dimensão de abertura da região em V da matriz que, neste caso, é de 40mm. Dessa forma, além da análise do ângulo e do raio na superfície, em conjunto com a primeira matriz, poderá ser avaliada também a influência da dimensão da abertura na região em V em diversos aspectos do ensaio de dobramento de chapas de materiais metálicos.

Nas Figuras 4.9 a 4.13 são exibidos os projetos/desenhos de fabricação dos cinco cutelos considerados, envolvendo os raios de dobramento apresentados na Tabela 4.5. Na Figura 4.14 pode ser observada uma representação dos mesmos. O projeto do suporte para os cutelos a ser acoplado à prensa é apresentado na Figura 4.15, seguido da representação esquemática, Figura 4.16.

Todas as peças foram confeccionadas com aço AISI 1045 temperado e revenido (dureza entre 40HRC e 45HRC), em um equipamento de usinagem por eletroerosão a fio marca *Baoma* modelo BMW, exibido na Figura 4.17. Ressalta-se que no caso das duas matrizes em V, inicialmente foi empregado o processo de fresamento, tendo sido descartado em virtude da dureza do material.

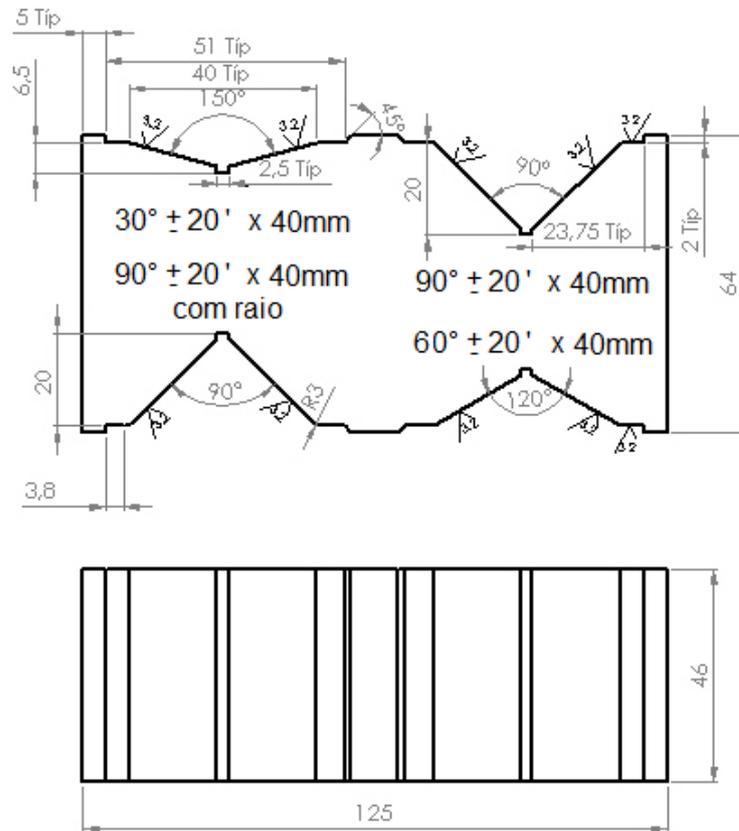


Figura 4.7 – Projeto da matriz para dobramento em V com abertura de 40mm.

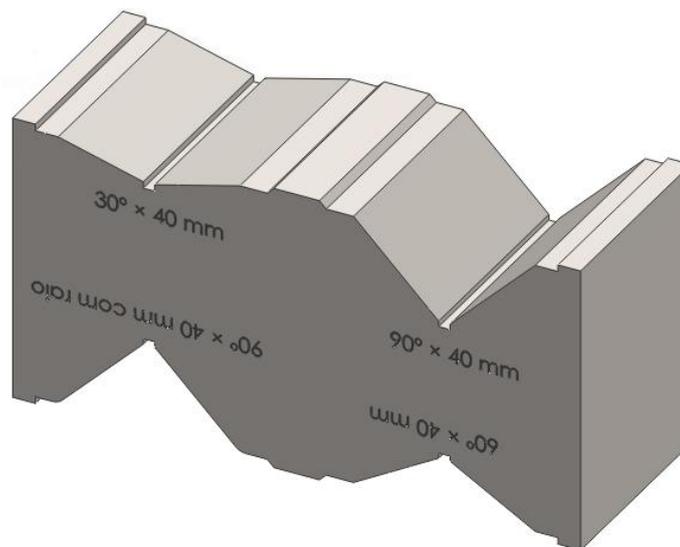


Figura 4.8 – Representação esquemática da matriz para dobramento em V com abertura de 40mm.

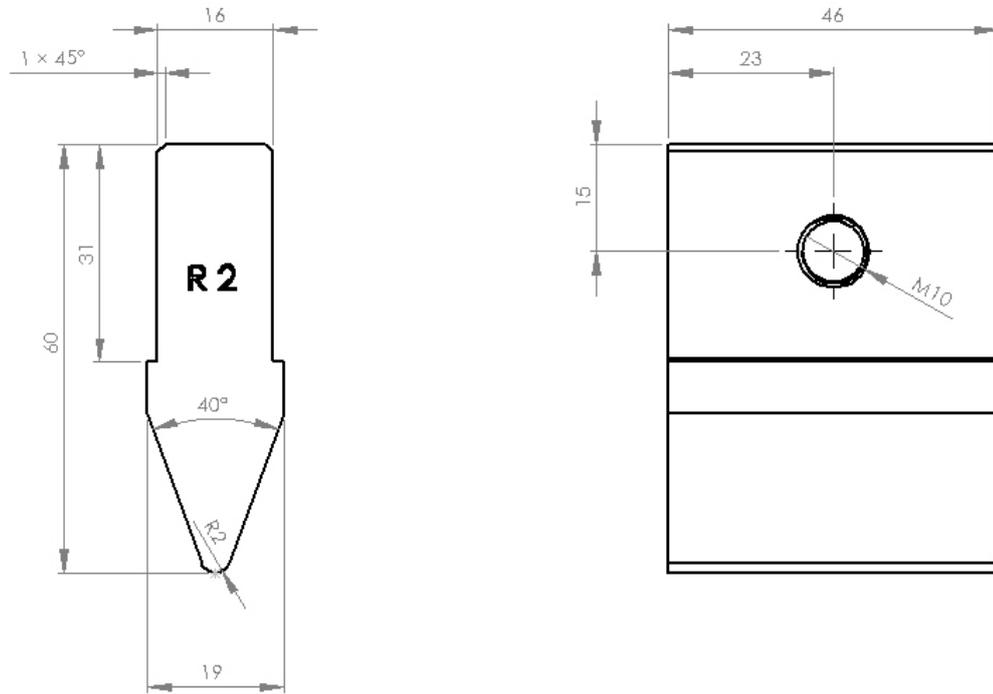


Figura 4.9 – Projeto do cutelo com raio de 2mm para a realização de dobramento.

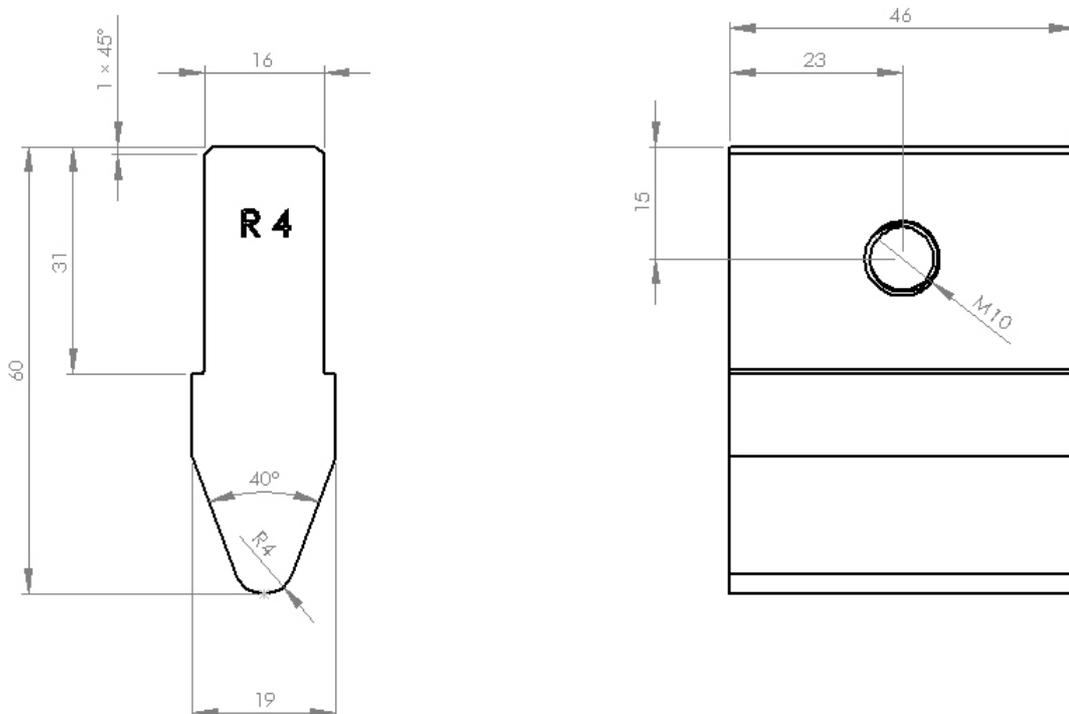


Figura 4.10 – Projeto do cutelo com raio de 4mm para a realização de dobramento.

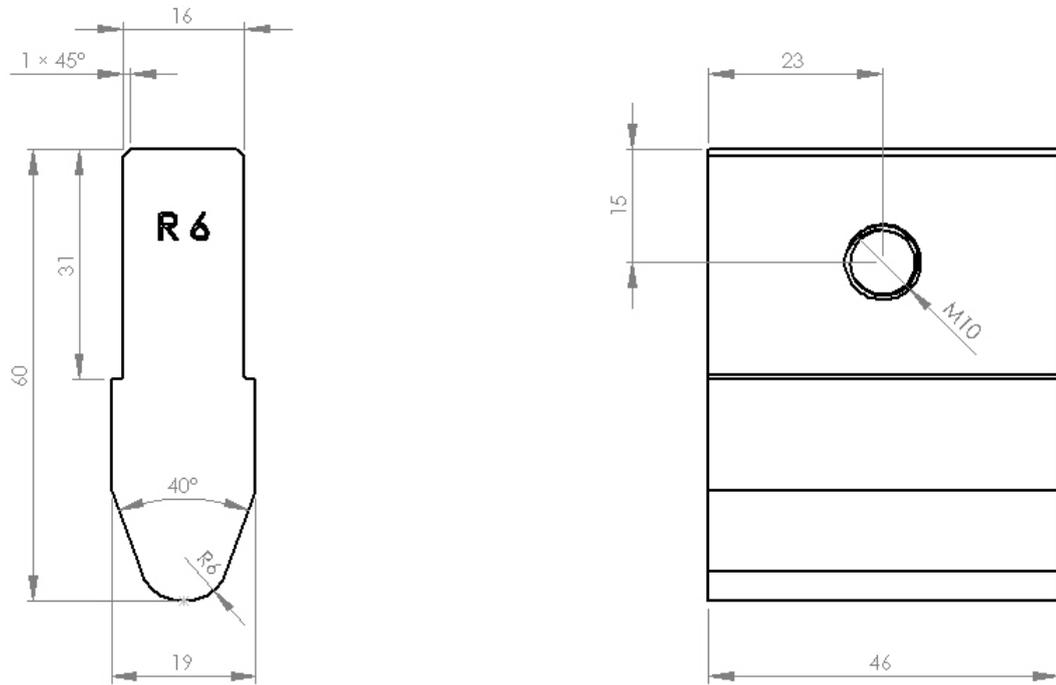


Figura 4.11 – Projeto do cutelo com raio de 6mm para a realização de dobramento.

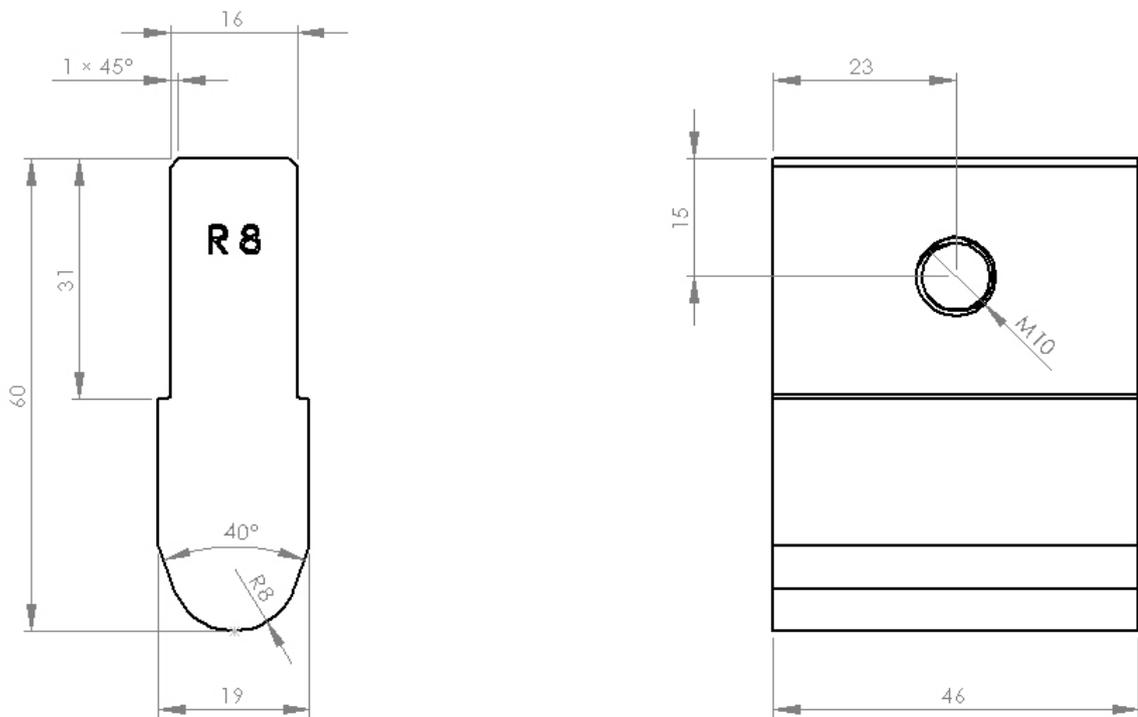


Figura 4.12 – Projeto do cutelo com raio de 8mm para a realização de dobramento.

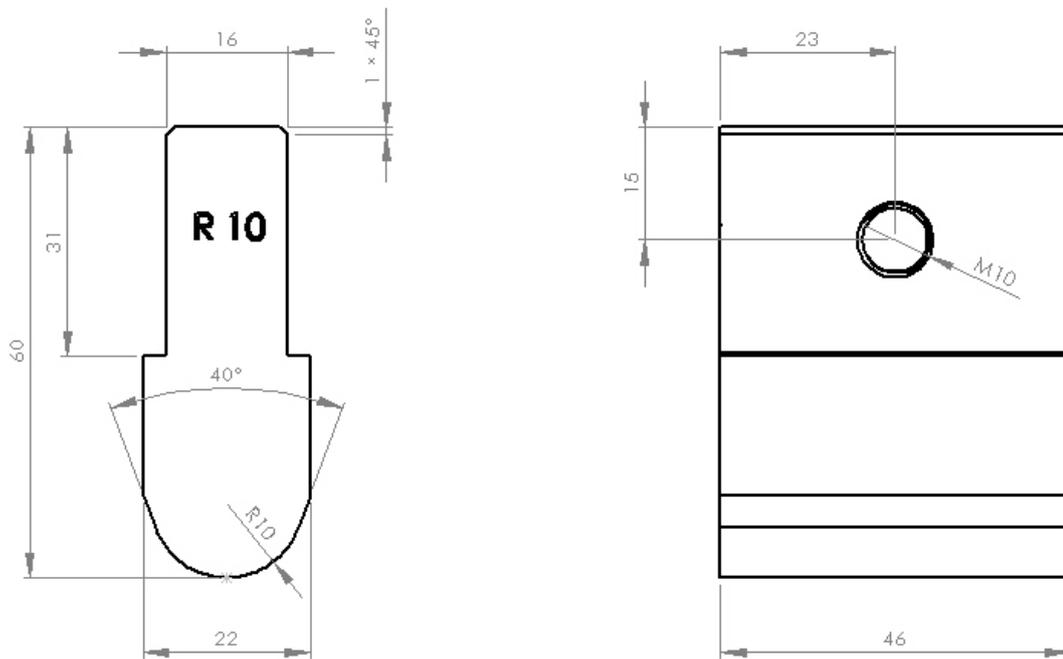


Figura 4.13 – Projeto do cutelo com raio de 10mm para a realização de dobramento.

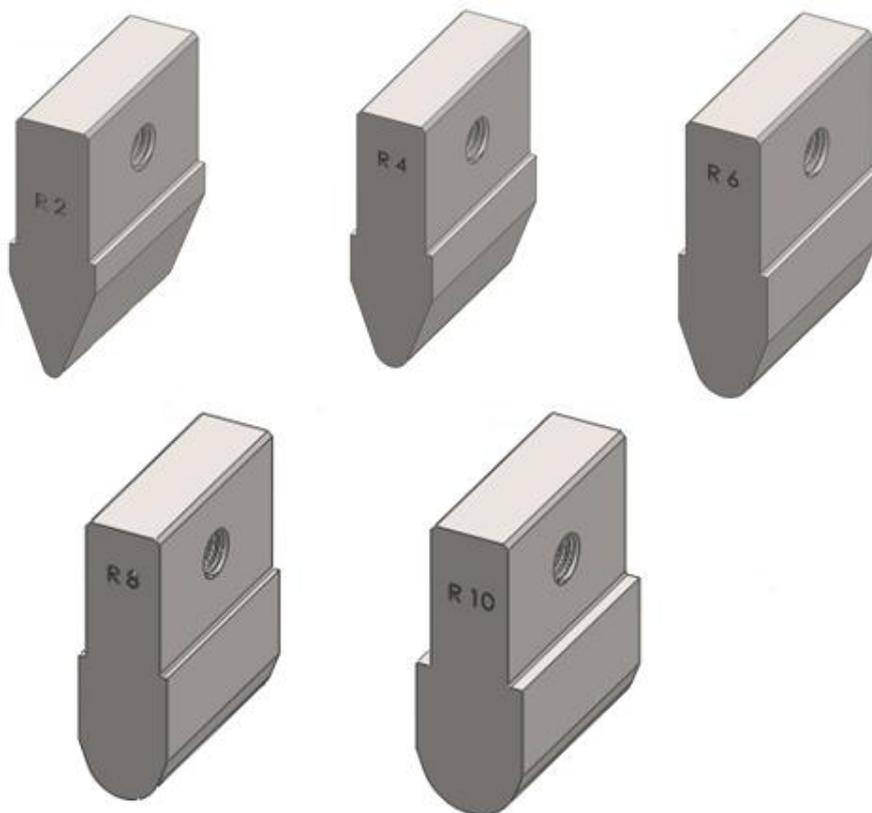


Figura 4.14 – Representação esquemática dos cutelos com raios de 2mm, 4mm, 6mm, 8mm e 10mm projetados para a realização de dobramento.

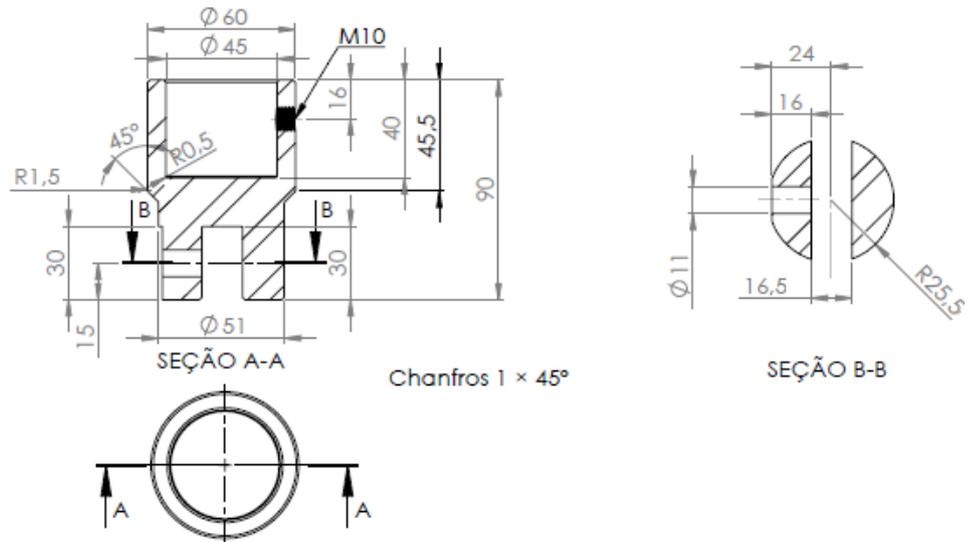


Figura 4.15 – Projeto do suporte para os cutelos de dobramento.



Figura 4.16 – Representação esquemática do suporte para os cutelos de dobramento.



Figura 4.17 – Equipamento de usinagem por eletroerosão a fio marca *Baoma*: (a) vista geral e (b) detalhe da máquina em operação.

4.4. Corpos de Prova

Dois tipos de corpos de prova foram utilizados no trabalho, de acordo com os experimentos conduzidos. O primeiro foi empregado efetivamente nos ensaios de dobramento e sua representação esquemática é exibida na Figura 4.18, acompanhada das dimensões e de uma imagem como exemplo. Ressalta-se que a espessura desse corpo de prova, assim como dos demais, foi a mesma das chapas no estado como recebidas, 1,8mm. Em termos de confecção, os corpos de prova foram cortados em duas guilhotinas das marcas *Newton* modelo TM 10 e *Pexto* modelo U-136-D e depois suas dimensões (largura e comprimento) e acabamento superficial na região do corte foram acertados em uma retificadora plana frontal marca *Zocca*, equipamentos mostrados nas Figuras 4.19 e 4.20, respectivamente. De forma a atender a análise planejada das variáveis de dobramento (representando um total de 15 condições), das características microestruturais do material (representando 3 condições para cada aço inoxidável) e possibilitar a realização de experimentos em tréplica, foram confeccionados 135 corpos de prova como o da Figura 4.18 de cada material. Os detalhes de cada condição são descritos nas seções a seguir.

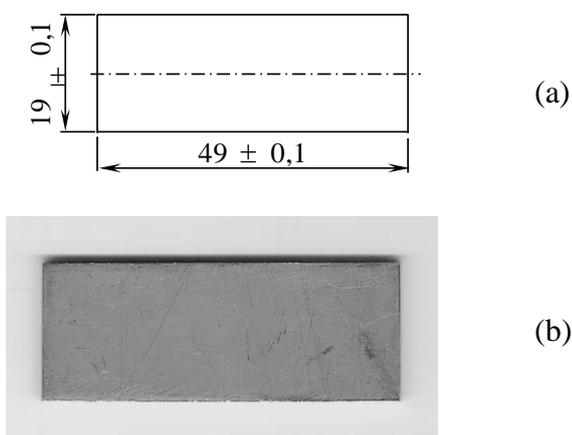


Figura 4.18 – Corpo de prova empregado nos experimentos de dobramento: (a) representação esquemática e (b) imagem.

O segundo tipo de corpo de prova, projetado e confeccionado de acordo com a Norma ASTM E8 (2009), foi aquele utilizado nos ensaios de tração, cuja representação é exibida na Figura 4.21 em conjunto com uma imagem. Neste caso, a confecção foi iniciada com o corte das

chapas na guilhotina marca *Newton* descrita anteriormente (Figura 4.19a) e depois com o uso do equipamento de usinagem por eletroerosão marca *Baoma*, também mencionado e exibido previamente (Figura 4.17). Uma vez que cada material foi investigado no estado inicial e após dois tratamentos térmicos distintos, considerando a possibilidade de realização de experimentos em tréplica, foram preparados 9 corpos de prova de tração para cada aço.



Figura 4.19 – Guilhotinas utilizadas no corte dos corpos de prova para os ensaios de dobramento: (a) equipamento marca *Newton* modelo TM 10 e (b) equipamento marca *Pexto* modelo U-136-D.



Figura 4.20 – Retificadora marca *Zocca*, utilizada para acertar as dimensões e o acabamento superficial dos corpos de prova para os ensaios dobramento: (a) vista geral e (b) detalhe dos corpos de prova.

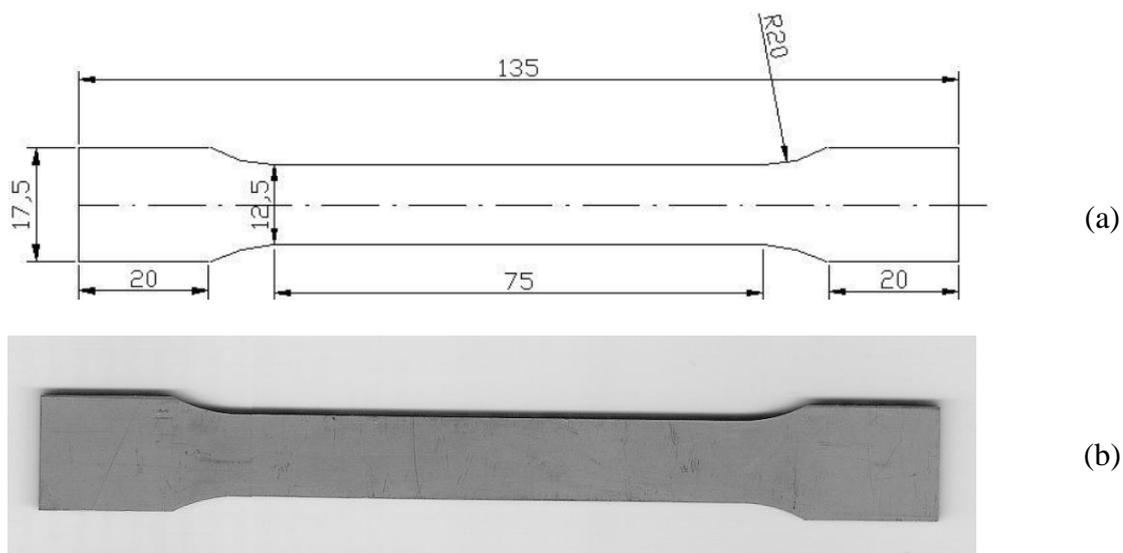


Figura 4.21 – Corpo de prova empregado nos ensaios de tração: (a) representação esquemática e (b) imagem (ASTM E8, 2009).

Por fim, foram ainda empregadas no trabalho amostras de geometrias e dimensões relativamente aleatórias, tratando-se das peças utilizadas na caracterização microestrutural (materiais no estado inicial/como recebido e após os tratamentos térmicos), nos testes preliminares para determinação das condições de tratamentos térmicos, nos ensaios de microdureza, dentre outros.

4.5. Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos dos materiais, conduzidos nos corpos de prova confeccionados para os ensaios de dobramento, de tração e os demais, foram realizados em um forno elétrico da marca *Magnus* com sistema de controle digital de temperatura (Figura 4.22). Duas condições de operação foram consideradas no trabalho, envolvendo um valor de temperatura e dois tempos de encharque. Para ambos os materiais, a temperatura empregada foi de 1050°C, escolha baseada em consulta à literatura (CORREA, 2004; MARTINS & FORTI, 2008). Esse valor foi utilizado visando remover os efeitos de eventuais processamentos mecânicos aos quais as chapas teriam sido submetidas sem, no entanto, promover o desenvolvimento de compostos intermetálicos (especialmente no caso do aço inoxidável duplex). Os tempos de encharque utilizados no processo foram de 15 minutos e de 60 minutos. A variação

considerada se deu com o objetivo de obter microestruturas distintas em termos de tamanho de grão (observado posteriormente apenas de maneira qualitativa). Os dois tratamentos térmicos foram finalizados com resfriamento ao ar.



Figura 4.22 – Forno elétrico marca *Magnus* empregado nos tratamentos térmicos.

4.6. Caracterização Microestrutural dos Materiais

A caracterização microestrutural dos aços inoxidáveis, conduzida nos materiais no estado como recebido e após os tratamentos térmicos, foi realizada através de ensaios metalográficos e difração de raios-X. Os ensaios metalográficos possibilitaram a observação detalhada da estrutura do material, envolvendo a análise dos constituintes e da morfologia e tamanho dos grãos. A difração de raios-X, por outro lado, possibilitou para o caso do aço inoxidável AISI 304 a verificação da possível presença de martensita formada pelo processamento mecânico anterior (metal no estado como recebido) e se a mesma teria sido anulada com a realização dos tratamentos térmicos. Já para o aço SAF 2205, a técnica serviria para verificar se seriam desenvolvidos durante o processamento térmico compostos intermetálicas frágeis, como as fases sigma e chi.

Em relação ao procedimento metalográfico, a preparação das amostras consistiu no emprego da técnica convencional, envolvendo: corte com disco abrasivo na presença de fluido refrigerante, embutimento a frio com acrílico autopolimerizante, lixamento com óxido de alumínio (lixas com granulometrias #240, #320, #400, #600 e #1200) e polimento com pasta

de diamante (granulometrias $9\mu\text{m}$ e $3\mu\text{m}$). Para o aço inoxidável AISI 304, o ataque químico foi conduzido com o reagente Água Régia (15ml de HCl, 5ml de HNO₃ e 100ml de H₂O) (ASM HANDBOOK, 2004). Já para o aço inoxidável SAF 2205, o reagente utilizado foi o Beraha (20 ml HCl and 100 ml de H₂O, 1,0g de K₂S₂O₅) (ASM HANDBOOK, 2004). As peças foram analisadas por microscopia óptica (MO) empregando um microscópio da marca *Fortel* (Figura 4.23).

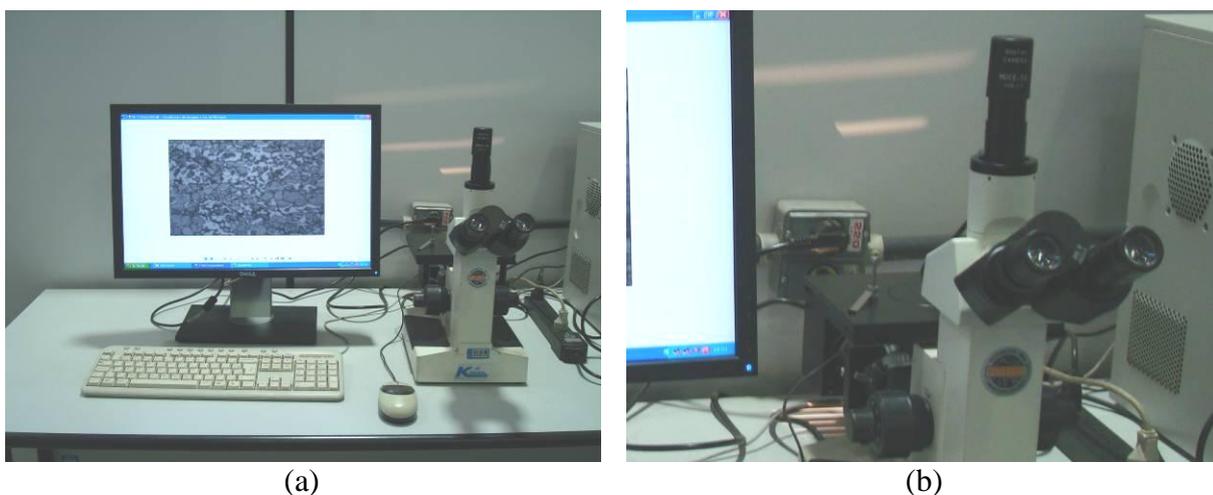


Figura 4.23 – Microscópio óptico marca *Fortel* utilizado na caracterização microestrutural dos metais: (a) vista geral com o sistema de digitalização e (b) detalhe.

A difração de raios-X foi realizada em um difratômetro com alvo metálico de cobre da marca *Shimadzu* modelo XRD-7000, com ângulo de varredura entre 30° a 100° e passo de $0,02\text{s}^{-1}$. Neste caso, a preparação das amostras envolveu apenas o lixamento das peças no estado inicial e tratadas termicamente. Na Figura 4.24 podem ser observadas duas imagens do difratômetro de raios-x empregado no estudo.

4.7. Ensaios de Tração

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal marca *Instron* modelo 5582 com sistema de controle e aquisição de dados *Blue Hill* e extensômetro eletrônico também da

marca *Instron* modelo 2630-100, conforme Figura 4.25. A velocidade de movimentação da garra superior da máquina em todos os testes foi de 4,5mm/min.



Figura 4.24 – Difratorômetro de raios-X marca *Shimadzu* empregado na caracterização microestrutural dos metais: (a) vista geral e (b) detalhe do sistema de fixação das amostras e goniômetro.

Os ensaios foram conduzidos nos dois materiais investigados no trabalho, no estado inicial e após os tratamentos térmicos. Para cada condição, foram empregados apenas dois corpos de prova, em virtude da aproximação dos resultados.



Figura 4.25 – Máquina universal de ensaios marca *Instron*: (a) vista geral e (b) detalhe de um dos corpos de prova durante o ensaio.

A máquina de tração forneceu dados de força e variação no comprimento útil no corpo de prova, essa última através do uso do extensômetro. Para o aço inoxidável SAF 2205, os dados foram obtidos até a carga máxima, início da estricção, momento no qual o extensômetro foi retirado e os corpos de prova foram tracionados até a ruptura. Para o aço inoxidável AISI 304, entretanto, o extensômetro teve que ser retirado um pouco antes, visto que foi atingido o limite de abertura do dispositivo. Os dados mencionados foram transformados em valores de tensão e deformação convencionais (DIETER, 1981). Além da curva de engenharia, foram determinados os valores da tensão limite de escoamento, da tensão limite de resistência e o alongamento % total das amostras. Os dois primeiros parâmetros foram calculados a partir das curvas tensão-deformação e o alongamento através da marcação dos corpos de prova.

Por fim, ressalta-se que os ensaios de tração, além de levarem à obtenção das curvas tensão-deformação e de algumas propriedades mecânicas dos materiais, possibilitaram a “produção” de amostras para a determinação das relações entre a deformação e a dureza Vickers, etapa importante para a análise da deformação no dobramento através da técnica dos perfis de microdureza, cujos detalhes são apresentados em uma seção a seguir.

4.8. Ensaios de Microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados para possibilitar a determinação da distribuição de deformação nos materiais após o dobramento. Dessa forma, os experimentos foram conduzidos em dois grupos distintos de corpos de prova. O primeiro se referiu às amostras apenas tracionadas, considerando diferentes regiões do comprimento útil do corpo de prova, que equivaleriam a diferentes magnitudes de deformação. Neste caso, o objetivo foi a obtenção de uma relação entre essa propriedade e a deformação para cada metal, em cada condição. O segundo grupo foi associado às peças efetivamente conformadas por dobramento, de forma a permitir a obtenção da distribuição de dureza ao longo da seção transversal do corpo de prova e, posteriormente, a distribuição de deformação. Os detalhes de cada procedimento e da técnica dos perfis de microdureza são exibidos na seção 4.9.

Em termos experimentais, os ensaios foram conduzidos em um microdurômetro marca *Shimadzu* modelo 2T, com penetrador Vickers, empregando carga de 500gf e tempo de aplicação de 15s. Na Figura 4.26 podem ser observadas imagens do equipamento. A

preparação das amostras para esses testes foi similar àquela conduzida para a caracterização microestrutural por microscopia óptica, com exceção do ataque com reagente químico.

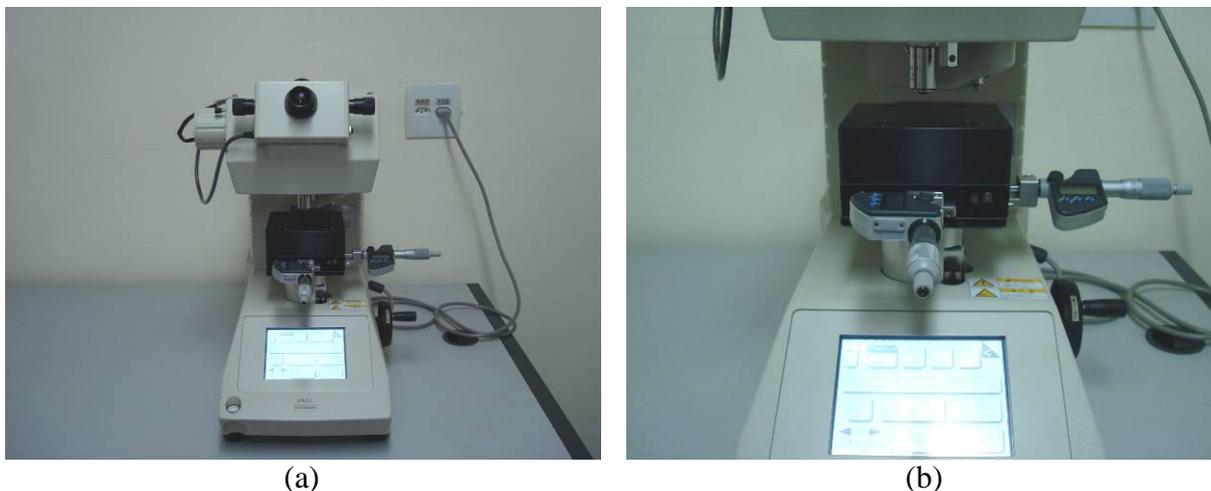


Figura 4.26 – Microdurômetro Vickers marca *Shimadzu* empregado no trabalho: (a) vista geral e (b) detalhe.

4.9. Dobramento dos Corpos de Prova

4.9.1. Realização dos ensaios de dobramento

Os ensaios de dobramento com matriz em V foram conduzidos em uma prensa hidráulica marca *Manley* modelo P1083, cujas imagens (vista geral e durante um ensaio) são mostradas na Figura 4.27. Em todos os testes, após o contato dos corpos de prova com a superfície interna das regiões em V da matriz, era aguardado um tempo de aproximadamente 5s. Após o término do período mencionado, o alívio dos esforços aplicados era conduzido, ou seja, o contato entre o cutelo e o material era interrompido e o corpo de prova era retirado para posterior análise.

As condições gerais de dobramento investigadas no presente trabalho são exibidas na Tabela 4.6. Nota-se que, apesar do desenvolvimento de dispositivos que possibilitariam a análise de outras variáveis, previamente descritos em detalhes, optou-se pela avaliação dos efeitos do ângulo e do raio de dobramento, fixando-se a largura da abertura da matriz e considerando

apenas as situações nas quais o encontro da referida abertura com a superfície formaria um ângulo reto.

Dessa forma, o trabalho envolveu a análise de quinze condições especificamente de ensaio, resultado do emprego de três ângulos e cinco raios de dobramento. Para cada situação, três corpos de prova foram utilizados e, considerando o estudo de dois materiais distintos e a variação das características dos mesmos (avaliados no estado como recebidos e após dois tratamentos térmicos cada), 270 peças foram submetidas ao ensaio de dobramento, 135 de cada liga metálica.

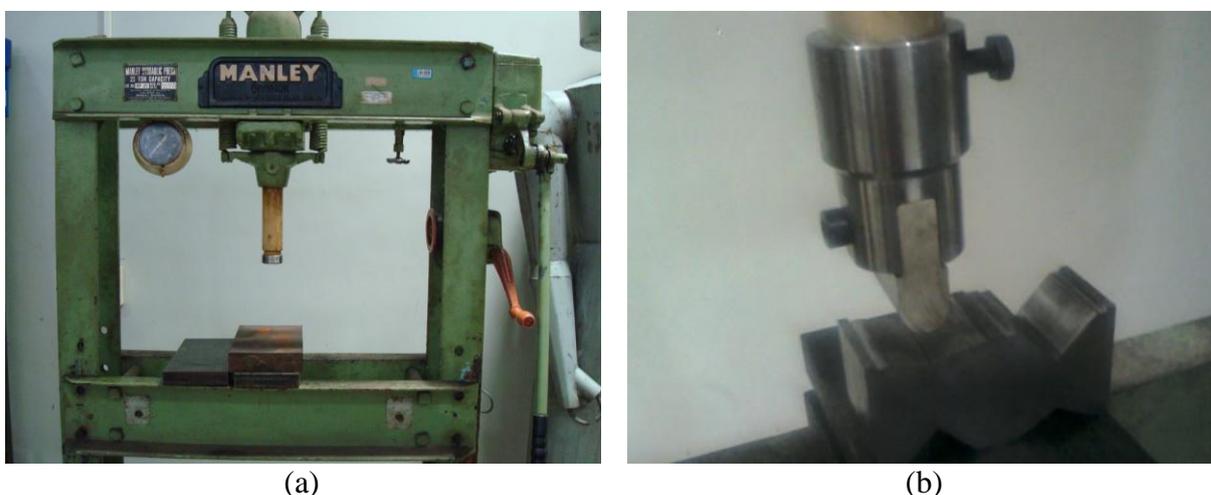


Figura 4.27 – Prensa marca *Manley* empregada nos ensaios de dobramento: (a) vista geral e (b) detalhe do equipamento com os dispositivos durante um ensaio.

Tabela 4.6 – Parâmetros gerais dos ensaios de dobramento conduzidos no trabalho.

ângulo de dobramento	raio de dobramento	largura da abertura da matriz	abertura da matriz com a superfície
30°, 60° e 90°	2mm, 4mm, 6mm, 8mm e 10mm	20mm	ângulos retos

4.9.2. Avaliação da superfície de dobramento dos corpos de prova

Após a operação de dobramento, todos os corpos de prova, considerando os cinco raios e os três ângulos de ensaio abordados no trabalho, assim como as réplicas, para os dois metais

investigados, nas condições como recebidos e tratados termicamente, foram avaliados em sua superfície externa. Este procedimento foi realizado em uma lupa marca *Metrimpex* (Figura 4.28), com ampliações de 6,5 vezes e 16 vezes. Antes da análise, para o caso dos metais dobrados previamente submetidos a tratamentos térmicos, os corpos de prova foram submersos durante 20 minutos em uma solução de ácido clorídrico e água (20ml de HCl e 80ml de água), com o objetivo de remover a camada oxidada e facilitar a verificação de eventuais trincas formadas nas peças.

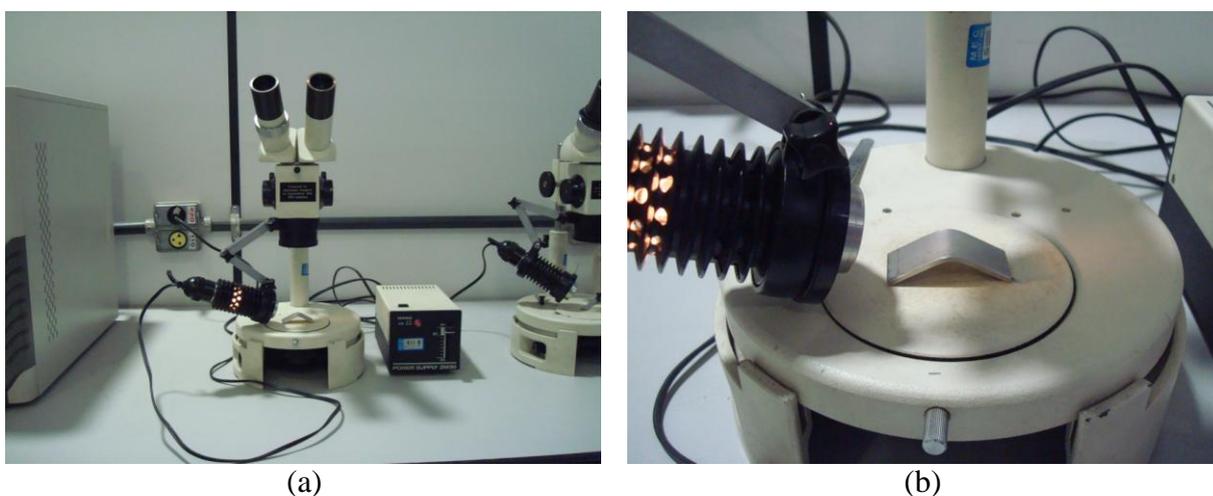


Figura 4.28 – Lupa marca *Metrimpex* empregada na análise da superfície externa de dobramento dos corpos de prova: (a) vista geral e (b) detalhe durante uma avaliação.

4.9.3. Análise do retorno elástico dos corpos de prova

Após os ensaios, similarmente à avaliação da superfície externa das peças, os ângulos de dobramento finais de todos os corpos de prova, em todas as condições consideradas no trabalho, foram medidos, empregando um goniômetro da marca *Helios*, conforme as imagens exibidas na Figura 4.29. Esse procedimento possibilitou a determinação do ângulo de retorno elástico, calculado a partir da diferença entre o ângulo de dobramento desejado (30°, 60° ou 90°) e o ângulo final obtido. Apesar de terem sido conduzidos três ensaios para cada situação investigada, os valores médios relativos ao retorno elástico apresentados nos resultados se referem a dois corpos de prova apenas, ou seja, a peça que apresentou recuperação elástica mais distinta das demais foi descartada para esta análise.

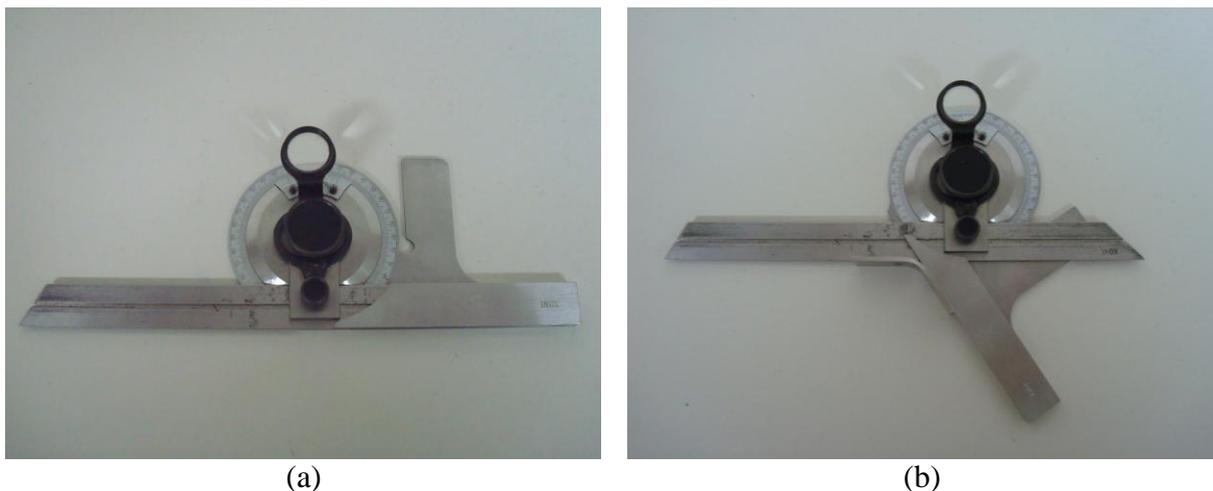


Figura 4.29 – Goniômetro marca *Helias* empregado na determinação do ângulo final de dobramento para posterior cálculo do retorno elástico: (a) equipamento e (b) corpo de prova durante a medição.

4.9.4. Determinação da distribuição de deformação no dobramento

A distribuição de deformação ao longo da seção transversal dos aços inoxidáveis dobrados foi determinada através da técnica dos perfis de microdureza (BACKOFEN, 1972; CETLIN, 1984; CORRÊA, 2004). Essa técnica, originalmente proposta para a análise da deformação no processo de trefilação, consiste basicamente em: 1) obtenção de uma relação entre a deformação real e a microdureza a partir de amostras do material analisado apenas tracionado; 2) determinação da distribuição de microdureza na região de interesse da amostra e 3) transformação dessa distribuição de microdureza em distribuição de deformação a partir da relação entre a deformação e a dureza já obtida. Na Figura 4.30 pode ser observado um exemplo de utilização do método para barras de alumínio comercialmente puro trefiladas (CETLIN, 1984).

No caso do presente trabalho, as seguintes condições de dobramento foram empregadas para análise da distribuição de deformação nos aços inoxidáveis: ângulo de 90° e raios de 2mm e de 8mm. Esse ângulo foi escolhido por, a princípio, dentre os três considerados nos experimentos, representar aquele que levaria a níveis de deformação mais acentuados no processo. Os raios, por outro lado, foram empregados de forma a investigar os efeitos de um valor que poderia ser apontado como reduzido e outro como relativamente elevado. Em

termos dos materiais, optou-se por analisar os corpos de prova dobrados no estado como recebidos e previamente tratados termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de encharque de 15 minutos.

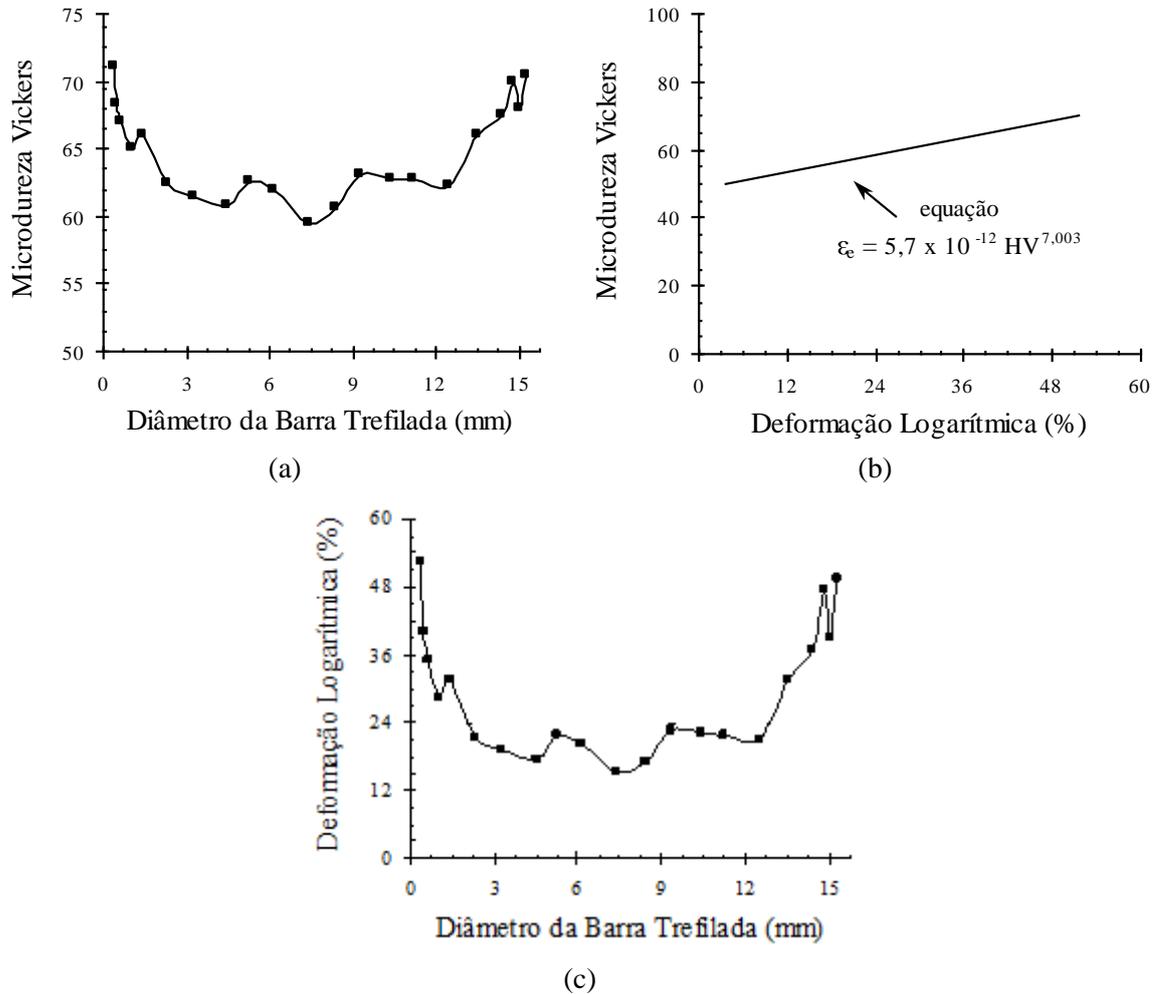


Figura 4.30 – Exemplo de utilização da técnica dos perfis de microdureza em barras de alumínio comercialmente puro: (a) distribuição de microdureza Vickers, (b) relação entre a deformação e a microdureza e (c) distribuição de deformação (CETLIN, 1984).

Conforme o procedimento descrito de maneira simplificada no início desta seção, inicialmente foi determinada a relação entre a deformação real ϵ_R e a dureza Vickers HV. Dentro deste contexto, expressões distintas foram desenvolvidas para cada material, em cada condição: como recebidos, tratados termicamente a 1050°C por 15 minutos e tratados termicamente a 1050°C por 60 minutos. Em termos experimentais, amostras oriundas de

diferentes regiões do comprimento útil dos corpos de prova previamente tracionados foram cortadas e preparadas metalograficamente para os ensaios de microdureza. A partir das dimensões do corpo de prova antes do ensaio (Figura 4.21) e das referidas regiões dos metais já tracionados (largura e espessura da amostra como um todo, no caso de uma porção associada à deformação uniforme, ou largura e espessura em uma linha específica, no caso de uma porção associada à deformação não uniforme, próxima à estrição), foram calculados os valores de deformação real, segundo a Equação (4.1). Após a realização de cinco testes de microdureza em cada amostra, os valores médios foram calculados e gráficos deformação ϵ_R x dureza Vickers HV foram elaborados para cada aço inoxidável nas três condições investigadas no trabalho (como recebidos e após os dois tratamentos térmicos). Por fim, as curvas ϵ_R x HV foram ajustadas através de uma aproximação por potência, levando ao desenvolvimento das expressões desejadas.

$$\epsilon_R = \ln \left(\frac{A_i}{A_f} \right) \quad (4.1)$$

Onde ϵ_R é a deformação real ou verdadeira, A_i e A_f são as áreas inicial e final da seção transversal dos corpos de prova, respectivamente.

Paralelamente à obtenção das expressões associando ϵ_R x HV, as distribuições de microdureza na seção transversal dos corpos de prova após o dobramento foram determinadas, considerando somente a linha central de cada peça e cinco pontos igualmente espaçados, sendo um deles no centro, conforme a representação esquemática da Figura 4.31.

Por fim, de posse das expressões associando a deformação real ϵ_R e a dureza HV e das distribuições de microdureza ao longo da seção transversal na linha central de dobramento, foram determinadas as distribuições de deformação nos dois materiais para as condições desejadas.

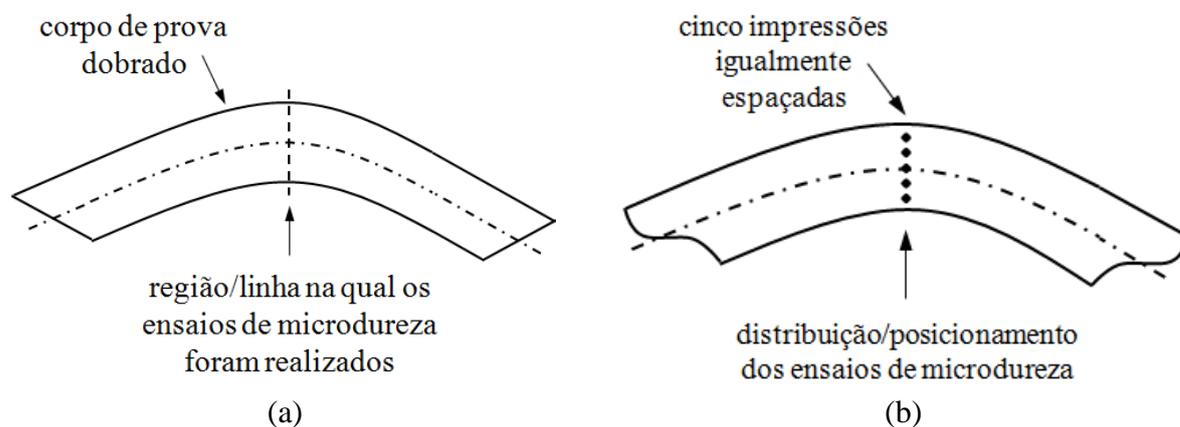


Figura 4.31 – Representação dos ensaios de microdureza conduzidos nos aços inoxidáveis após dobramento para posterior determinação da distribuição de deformação nos corpos de prova: (a) região/linha e (b) posicionamento dos ensaios/impressões.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização dos Materiais no Estado Inicial

Os resultados relativos à caracterização dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 no estado como recebidos são apresentados nas figuras e tabela a seguir, envolvendo as técnicas de metalografia, difração de raios-X e ensaio de tração.

Na Figura 5.1 podem ser observadas as fotomicrografias obtidas através de microscopia óptica dos dois materiais. Considerando inicialmente o aço AISI 304, nota-se a presença de grãos e maclas, microestrutura típica do referido metal. Em adição ao arranjo mencionado, verifica-se também a ocorrência de estrutura martensítica (setas brancas indicando exemplos), cuja formação certamente está associada ao processo de fabricação das chapas, laminação, conduzido anteriormente. A formação deste tipo de estrutura durante a deformação plástica a frio de aços inoxidáveis austeníticos é um fenômeno conhecido e foi discutido na seção 3.1.2. Já a imagem do aço SAF 2205 evidencia a presença da estrutura bifásica da liga: grãos de ferrita (exemplificados por setas brancas) e de austenita (exemplificados por setas negras). Os resultados apresentados estão de acordo com aqueles obtidos através de difração de raios-X, conforme pode ser verificado na Figura 5.2. Neste caso, observa-se a ocorrência de picos típicos de austenita γ e, de maneira menos acentuada, de martensita α' , para o aço AISI 304, e picos de austenita γ e ferrita α , para o aço SAF 2205.

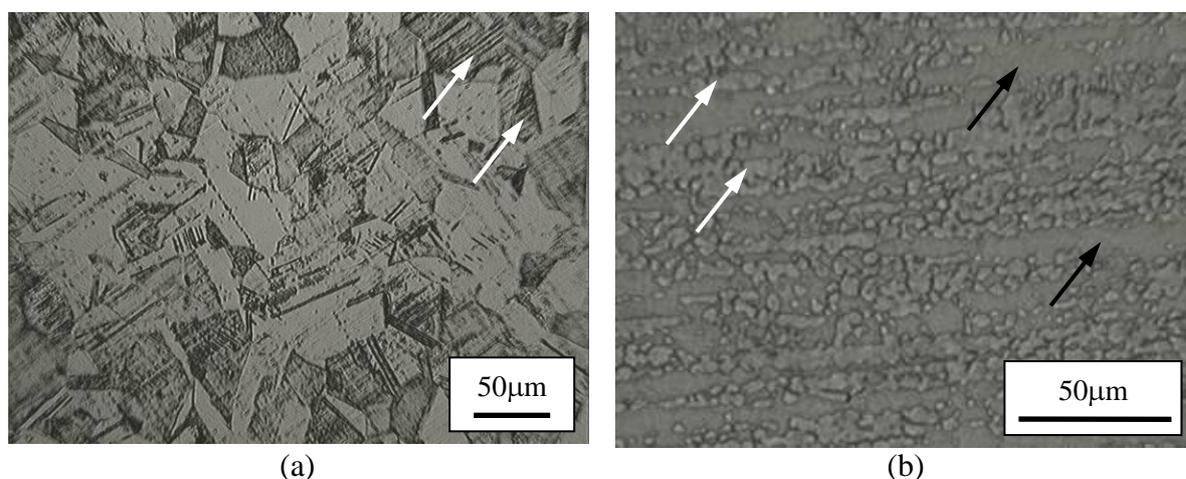


Figura 5.1 – Micrografias (MO) dos aços inoxidáveis no estado inicial: (a) aço AISI 304 e (b) aço SAF 2205.

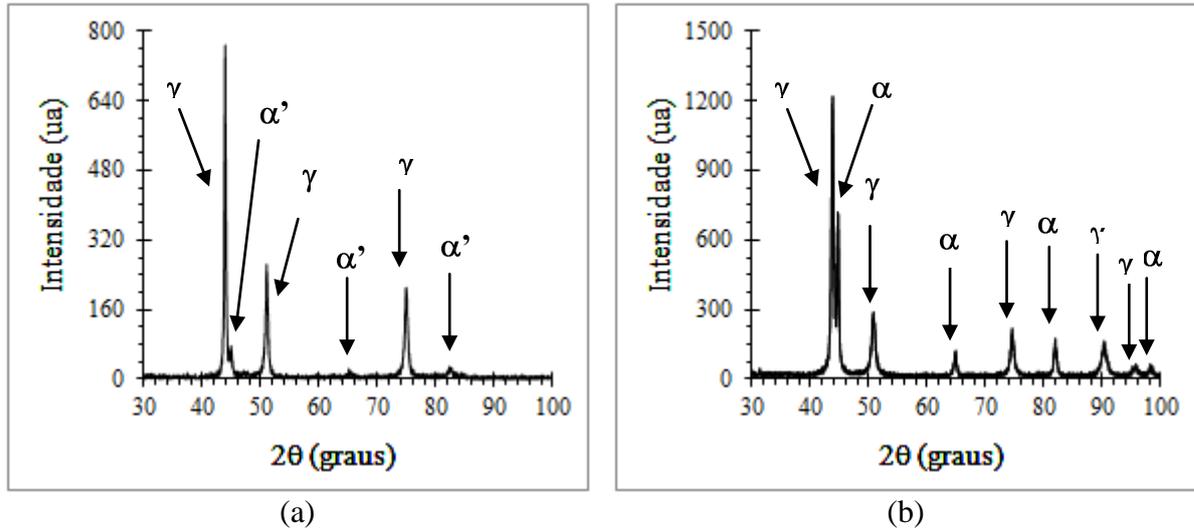


Figura 5.2 – Difratomogramas dos aços inoxidáveis no estado inicial: (a) aço AISI 304 e (b) aço SAF 2205 (austenita γ , ferrita α , martensita α')

Na Figura 5.3 são exibidas as curvas tensão - deformação convencionais determinadas através dos ensaios de tração dos aços inoxidáveis investigados. Ressalta-se que, para o aço SAF 2205, as curvas são apresentadas apenas até o início da estricção e para o aço inoxidável AISI 304 as curvas terminam um pouco antes da mesma, como explicado no capítulo anterior. Verifica-se que o aço inoxidável AISI 304 no estado inicial exibe resistência mecânica inferior ao outro material. Sua ductilidade, entretanto, aparentemente é superior, assim como sua capacidade de encruamento (observada pela inclinação da curva tensão – deformação).

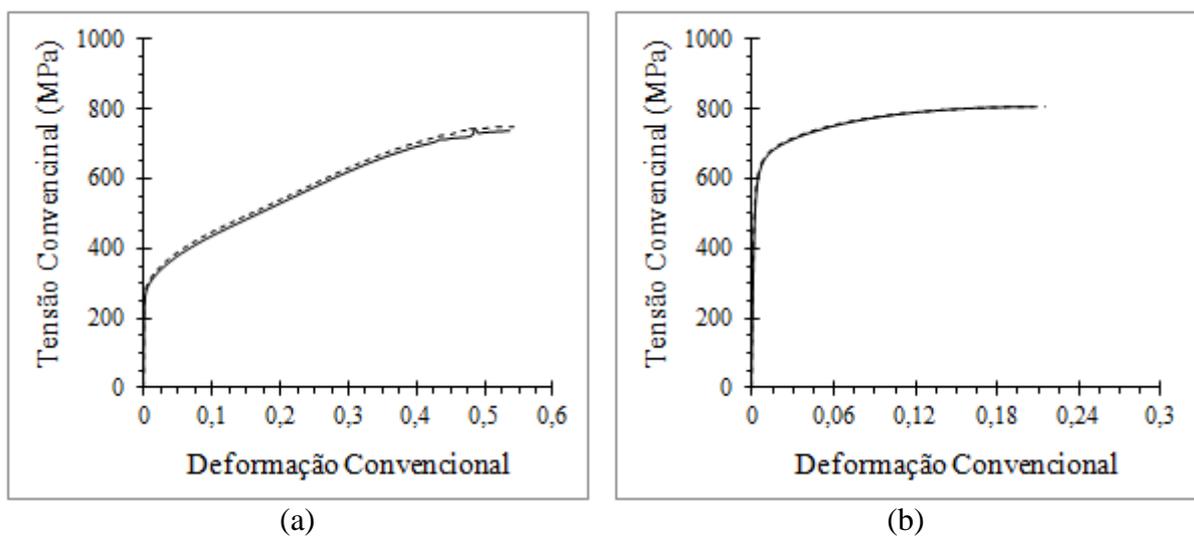


Figura 5.3 – Curvas tensão convencional (MPa) – deformação convencional obtidas no ensaio de tração dos materiais no estado como recebidos: (a) aço AISI 304 e (b) aço SAF 2205.

As propriedades resistência mecânica e ductilidade, avaliadas através das tensões limite de escoamento e limite de resistência à tração e alongamento total, são mostradas na Tabela 5.1. Assim como havia sido observado em relação à figura 5.3, o aço SAF 2205 exibiu resistência mecânica superior e ductilidade inferior ao aço AISI 304.

Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas dos materiais no estado como recebidos.

material	limite de escoamento	limite de resistência	alongamento total
aço AISI 304	272MPa	763MPa	90,5%
aço SAF 2205	620MPa	806MPa	35%

5.2. Caracterização dos Materiais Após os Tratamentos Térmicos

A microestrutura desenvolvida nos tratamentos térmicos do aço inoxidável AISI 304 é apresentada na Figura 5.4. Para ambas as condições de processamento térmico, observa-se a presença de grãos de austenita e maclas. Este fato é confirmado através dos resultados obtidos por difração de raios-X, nos quais são notados picos de intensidade em função de 2θ associados apenas à estrutura austenítica γ (Figura 5.5). Dessa forma, verifica-se que, a princípio, o tratamento térmico removeu a presença da martensita α' , previamente verificada, decorrente da fabricação das chapas. A diferença entre as duas imagens, ou seja, entre os tempos de encharque empregados no tratamento térmico, se deu em relação ao tamanho de grão (observado de maneira apenas qualitativa) conforme esperado: um maior tempo de encharque levou à ocorrência de grãos de tamanho mais elevado.

Os resultados dos ensaios de tração realizados no aço AISI 304 tratado termicamente são exibidos na Figura 5.6 e na Tabela 5.2. Observa-se que o processamento térmico levou a uma diminuição da resistência mecânica do material e um aumento na ductilidade, conforme o esperado, retirando os efeitos da deformação plástica anterior, como o encruamento e a transformação martensítica. A alteração na resistência foi mais pronunciada com o aumento do tempo de encharque, ou seja, com a elevação no tamanho de grão. Entretanto, não foi verificada diferença significativa em termos de ductilidade para os corpos de prova tratados termicamente, analisada através dos resultados de alongamento % total.

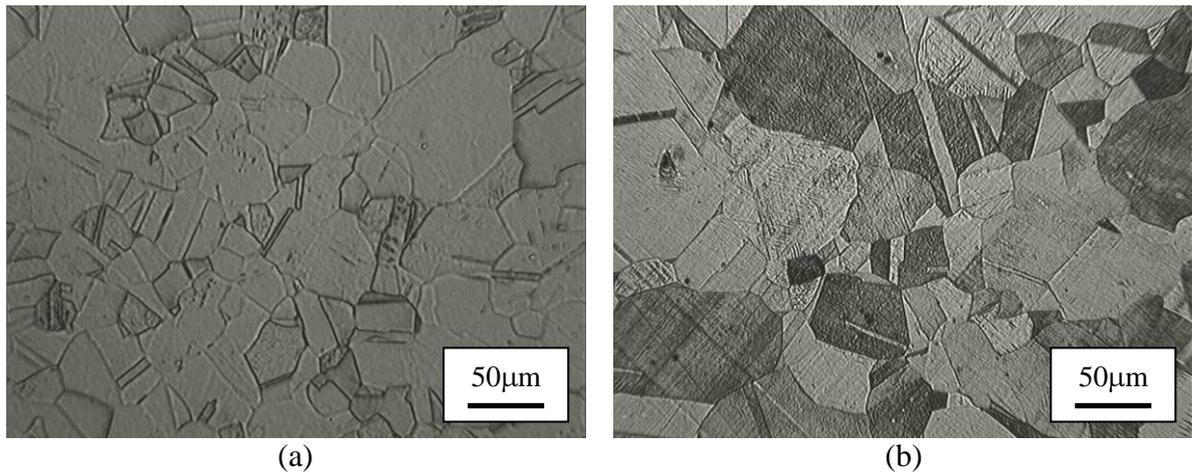


Figura 5.4 – Micrografias (MO) do aço inoxidável AISI 304 tratado termicamente: (a) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 15 minutos e (b) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 60 minutos.

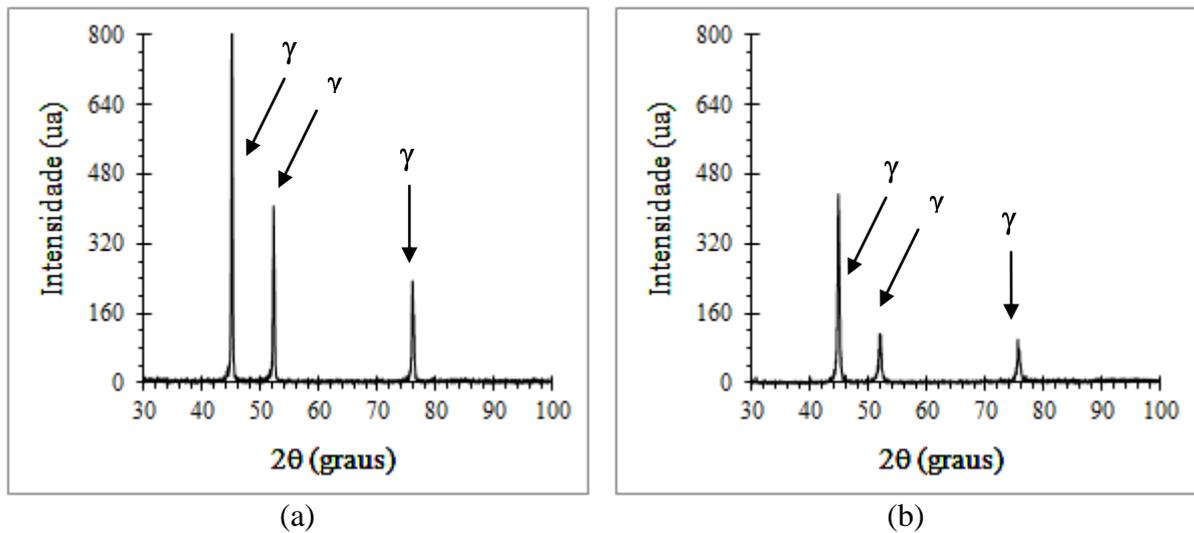


Figura 5.5 – Difratomogramas do aço inoxidável AISI 304 tratado termicamente: (a) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 15 minutos e (b) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 60 minutos.

Na Figura 5.7 são mostradas as fotomicrografias do aço SAF 2205 submetido aos dois tratamentos térmicos considerados no trabalho. Similarmente ao aço inoxidável AISI 304, verifica-se que a elevação no tempo de encharque levou ao aumento no tamanho de grão da liga metálica, tanto em termos de ferrita (grãos de coloração mais escura) como em termos de

austenita (grãos de coloração mais clara). Os resultados de difração de raios-X (Figura 5.8) comprovam que a estrutura presente continuou sendo composta de ferrita e austenita, sem o surgimento de nenhuma fase intermetálica como, por exemplo, a fase sigma.

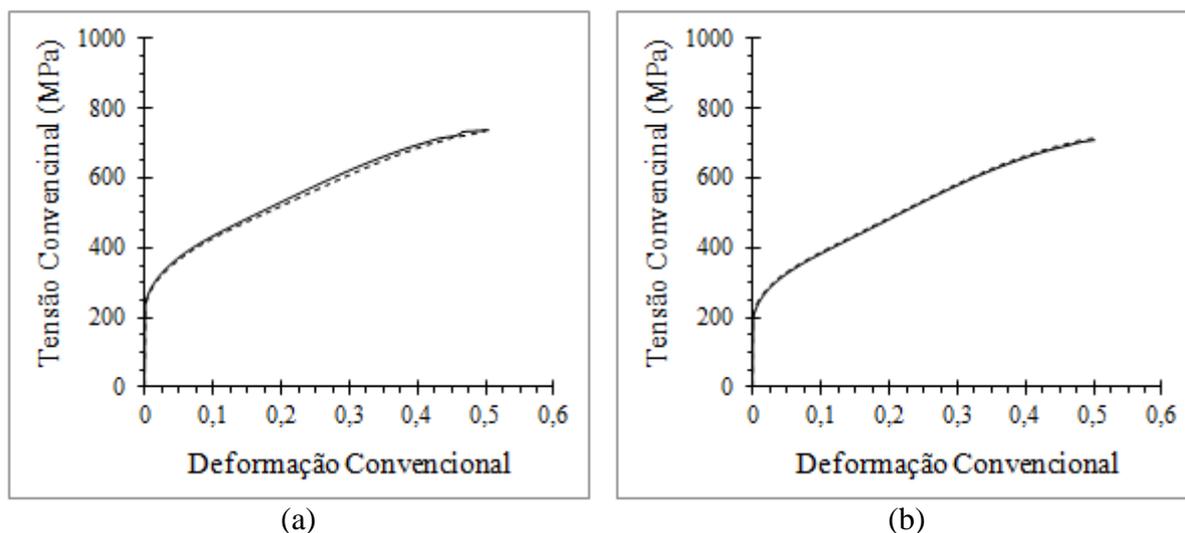


Figura 5.6 – Curvas tensão convencional (MPa) – deformação convencional obtidas no ensaio de tração do aço AISI 304 após o tratamento térmico: (a) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 15 minutos e (b) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 60 minutos.

Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304 tratado termicamente..

tratamento térmico	limite de escoamento	limite de resistência	alongamento total
1050°C / 15 minutos	250MPa	776MPa	96%
1050°C / 60 minutos	215MPa	750MPa	95%

Na Figura 5.9 e na Tabela 5.3 são exibidos os resultados dos ensaios de tração realizados no aço inoxidável SAF 2205 tratado termicamente. Verifica-se que, como no caso do aço inoxidável AISI 304, os tratamentos promoveram uma redução na resistência mecânica, observada através das curvas tensão deformação e dos valores de tensão limite de escoamento e tensão limite de resistência, e um aumento na ductilidade do metal. Em relação à primeira propriedade, o fenômeno se tornou mais pronunciado com a elevação do tamanho de grão

(ocorrido em virtude do tempo mais longo de processamento térmico). Para o caso da ductilidade, no entanto, novamente foi constatado que a alteração no tempo de encharque conduzida nos experimentos não ocasionou uma mudança com considerável nos valores de alongamento total uniforme.

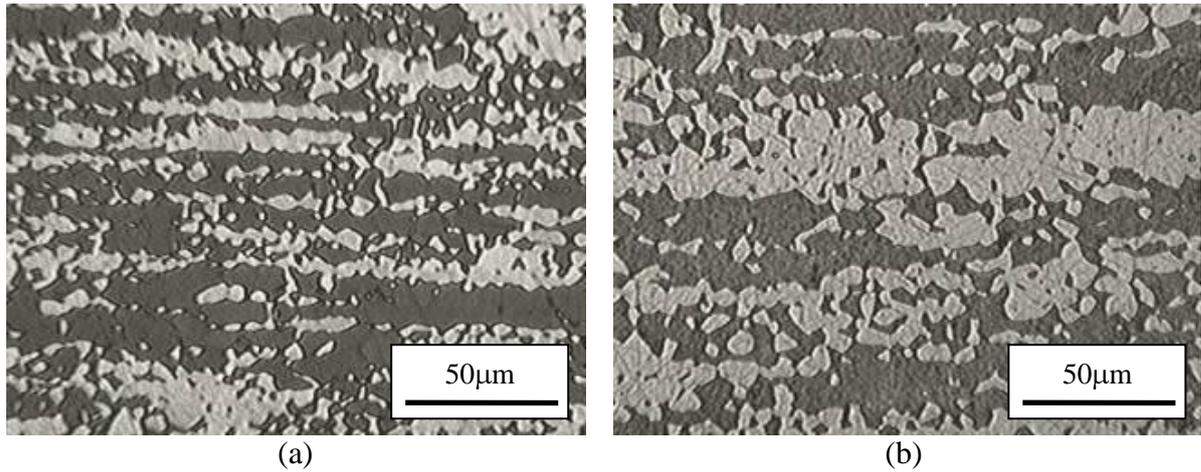


Figura 5.7 – Micrografias (MO) do aço inoxidável SAF 2205 tratado termicamente: (a) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 15 minutos e (b) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 60 minutos.

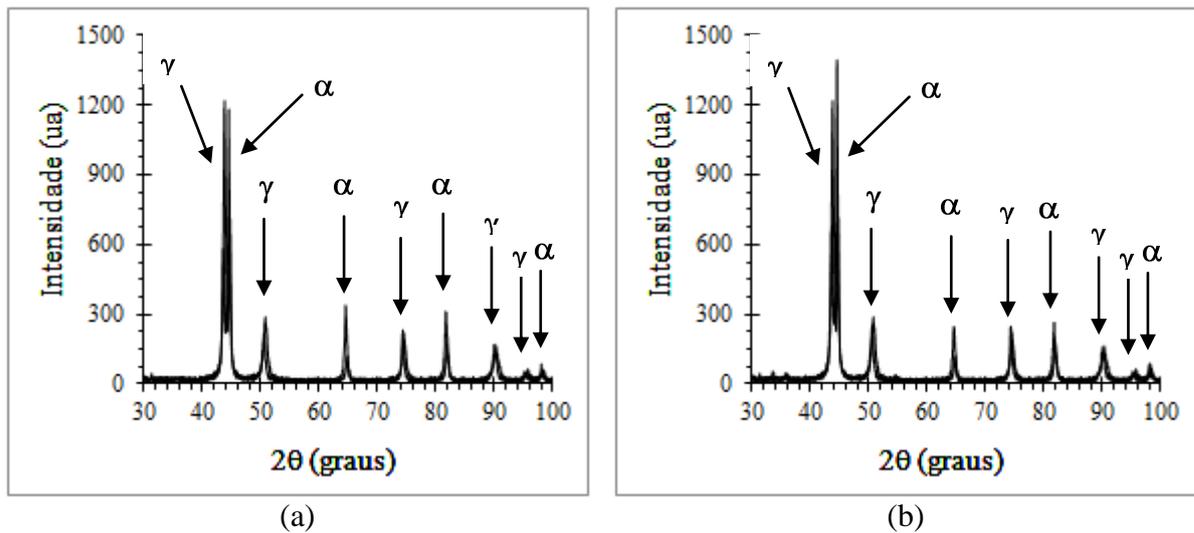


Figura 5.8 – Difratomogramas do aço inoxidável SAF 2205 tratado termicamente: (a) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 15 minutos e (b) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 60 minutos.

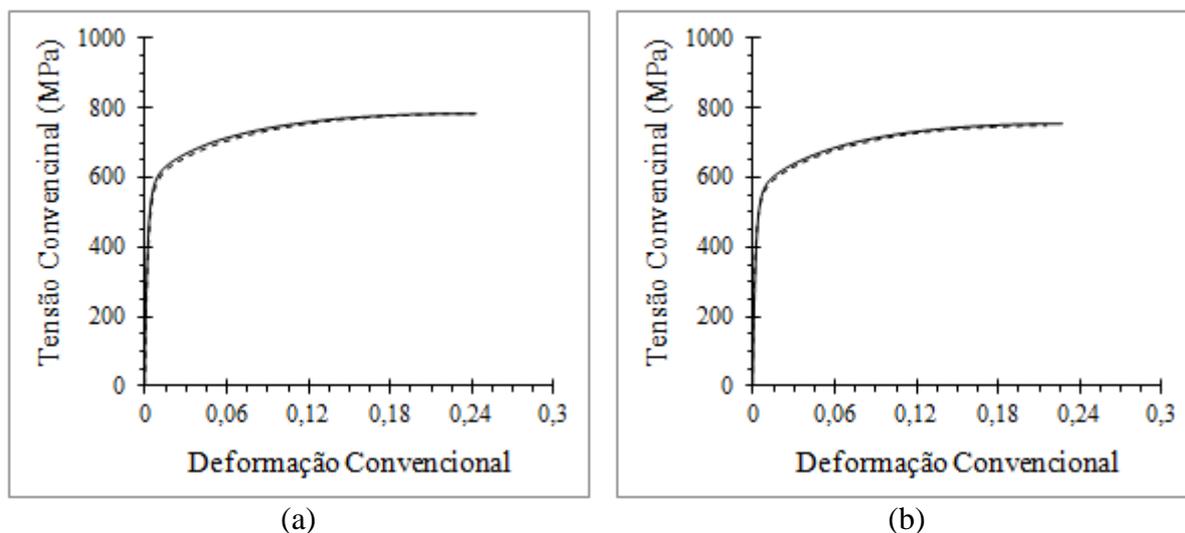


Figura 5.9 – Curvas tensão convencional (MPa) – deformação convencional obtidas no ensaio de tração do aço SAF 2205 após o tratamento térmico: (a) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 15 minutos e (b) temperatura = 1050°C e tempo de encharque = 60 minutos.

Tabela 5.3 – Propriedades mecânicas do aço inoxidável SAF 2205 tratado termicamente.

tratamento térmico	limite de escoamento	limite de resistência	alongamento total
1050°C / 15 minutos	550MPa	786MPa	37,5%
1050°C / 60 minutos	525MPa	754MPa	38,5%

5.3. Dispositivos Projetados e Confeccionados para a Realização de Dobramento

As imagens das matrizes para realização de ensaios de dobramento em V confeccionadas em aço AISI 1045 temperado e revenido podem ser observadas na Figura 5.10. Ressalta-se que a peça empregada nos experimentos cujos resultados são apresentados e discutidos neste trabalho aparece na Figura 5.10(a), (b) e (c), correspondendo à matriz com abertura de 20mm.

Na Figura 5.11 são mostradas as imagens dos cutelos com os raios de 2mm, 4mm, 6mm, 8mm e 10mm especialmente projetados e confeccionados também em aço AISI 1045 para o presente projeto de pesquisa. Por fim, o suporte para acoplamento dos cutelos à prensa pode ser observado na figura 5.12.

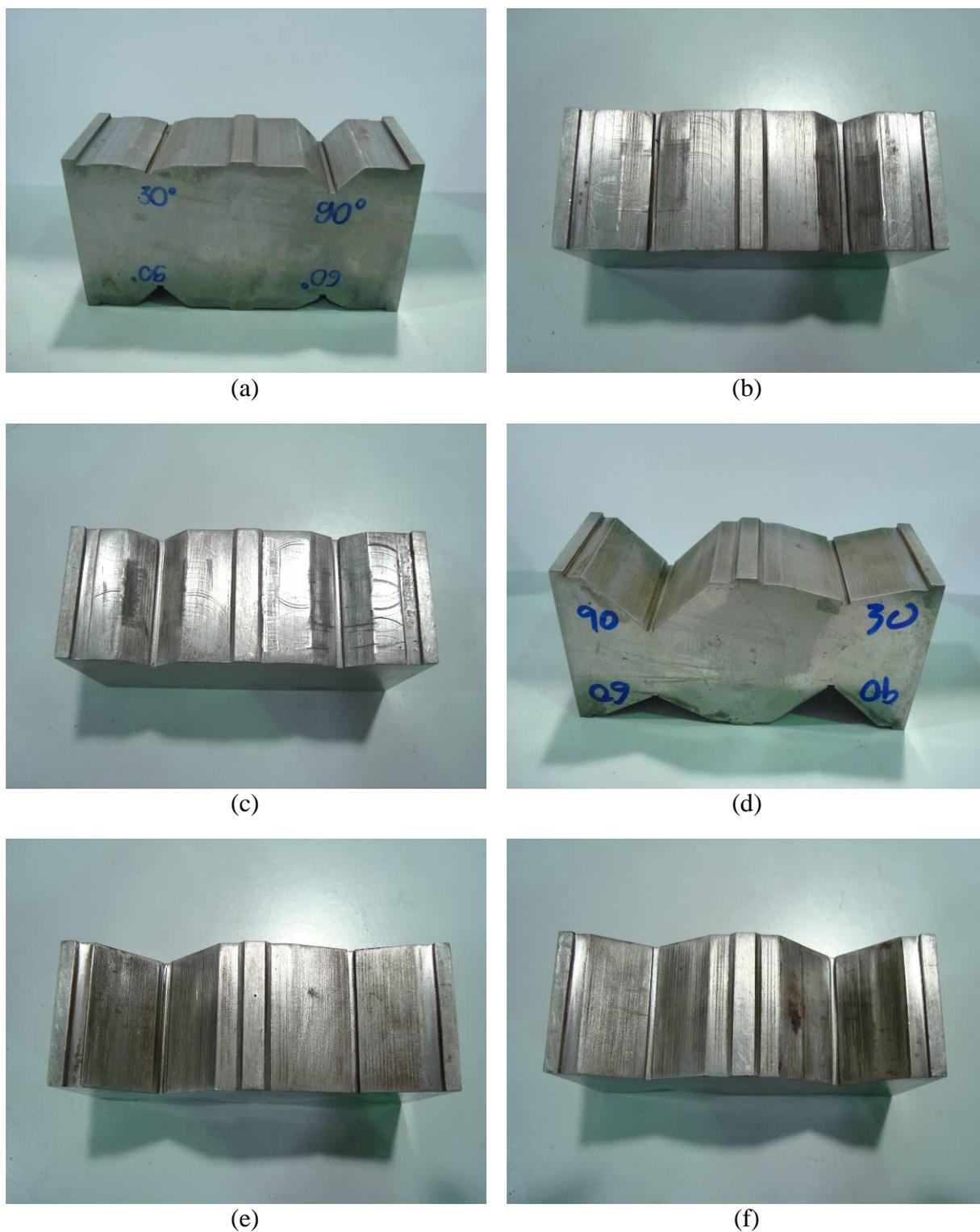


Figura 5.10 – Imagens das matrizes confeccionadas em aço AISI 1045 temperado e revenido para a realização de ensaios de dobramento em V: (a), (b) e (c) matriz com abertura de 20mm; (d), (e) e (f) matriz com abertura de 40mm.



Figura 5.11 – Imagens dos cutelos com raios de 2mm, 4mm, 6mm, 8mm e 10mm confeccionados m aço AISI 1045 temperado e revenido para a realização de dobramento: (a) e (b) vistas distintas.



Figura 5.12 – Imagens do suporte confeccionado para adaptar os cutelos de dobramento à prensa: (a) dispositivo e parafusos e (b) dispositivo com um dos cutelos acoplado.

5.4. Avaliação da Superfície dos Materiais após o Dobramento

A superfície externa de dobramento de todas as peças foi analisada, considerando as quinze condições de ensaio e os três estados de cada material, além das réplicas, conforme procedimento descrito na seção 4.9.2.

De acordo com a técnica conduzida, não foram observadas trincas ou outras irregularidades decorrentes do processo de dobramento. Em termos das características dos materiais, a condição na qual haveria uma maior chance de aparecimento de trincas seria no estado como recebido, uma vez que os materiais ainda estariam influenciados pelos efeitos das operações de fabricação anteriores (por exemplo, encruamento). Em termos das condições de dobramento, ângulos mais elevados e raios de dobramento menores representariam as situações consideradas mais críticas. Nas Figuras 5.13 e 5.14 são apresentadas, como exemplos, imagens das superfícies externas dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 no estado como recebidos após a realização de dobramento em V com ângulo de 90° e raios de 2mm, 6mm e 10mm. A ausência de trincas e outras irregularidades pode ser confirmada através da observação das figuras.

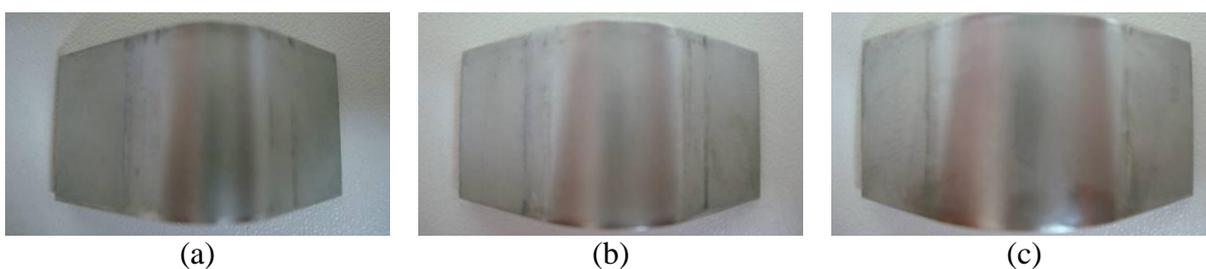


Figura 5.13 – Imagens da superfície externa do aço inoxidável AISI 304 no estado como recebido após o dobramento em V realizado com ângulo de 90° - raio de: (a) 2mm, (b) 6mm e (c) 10mm.

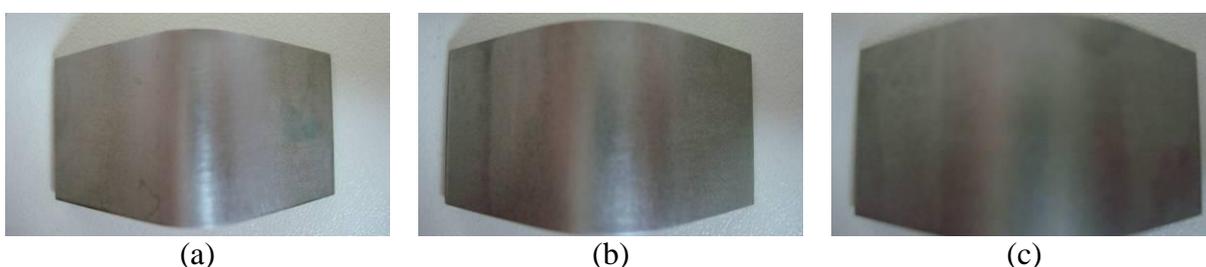


Figura 5.14 – Imagens da superfície externa do aço inoxidável SAF 2205 no estado como recebido após o dobramento em V realizado com ângulo de 90° - raio de: (a) 2mm, (b) 6mm e (c) 10mm.

5.5. Análise do Retorno Elástico dos Materiais no Dobramento

Nas Figuras 5.15 e 5.16 são apresentadas, como exemplos, imagens através das quais pode ser observado, de maneira qualitativa, o fenômeno de recuperação elástica no dobramento dos aços inoxidáveis SAF 2205 e AISI 304. Os valores médios dos ângulos de retorno elástico para todas as condições, determinados conforme a seção 4.9.3, são exibidos nas Tabelas 5.4 a 5.9, seguidas das Figuras 5.17 a 5.19, nas quais são mostrados os valores organizados em função do raio de dobramento para cada ângulo inicial de operação. Nota-se que, em todas as situações, os resultados são associados a uma linha de tendência, cuja aproximação escolhida foi linear. Essas linhas de tendência serviram de base para a análise dos resultados apresentada a seguir.

Considerando inicialmente os aços inoxidáveis no estado como recebidos (Figura 5.17) nota-se que, de maneira geral, com exceção do aço inoxidável SAF 2205 dobrado com ângulo de 30°, o aumento no raio de dobramento levou à elevação do ângulo de retorno elástico. De forma similar, para ambos os materiais, o fenômeno de retorno elástico se tornou mais acentuado com o ângulo inicial de dobramento (de 30° para 60° e de 60° para 90°). Por fim, comparando os resultados exibidos pelas duas ligas, observa-se que o aço inoxidável SAF 2205 apresentou valores de ângulo de recuperação elástica mais elevados que o aço inoxidável AISI 304.

Analogamente ao comportamento verificado durante o processamento no estado como recebidos, os dois materiais tratados termicamente (Figuras 5.18 e 5.19), em geral, exibiram uma tendência à elevação do fenômeno de retorno elástico com o raio de dobramento, apresentando como exceção duas situações associadas ao ângulo inicial de 30°, uma para cada liga. Por outro lado, contrastando com os resultados mostrados na Figura 5.17, não foi verificada a tendência geral de aumento do ângulo de retorno elástico com a elevação do ângulo de dobramento inicial, exceto para o aço inoxidável SAF 2205 tratado termicamente com tempo de encharque de 15 minutos. Novamente, entretanto, para as duas condições de processamento térmico, o aço inoxidável duplex exibiu o efeito mola de forma mais pronunciada.

Por fim, comparando os resultados mostrados pelos aços inoxidáveis no estado como recebidos com aqueles apresentados pelos materiais tratados termicamente, nota-se que o

processamento térmico com tempo de encharque de 15 minutos levou, de forma geral, a um decréscimo nos ângulos de retorno elástico em relação às ligas no estado original, assim como foi observado para os corpos de prova tratados com tempo de encharque de 60 minutos. Entretanto, essa tendência não foi verificada ao confrontar os dados relativos às peças apenas tratadas, sendo o comportamento (aumento ou queda no efeito mola com alteração do tempo de encharque) relativamente aleatório.

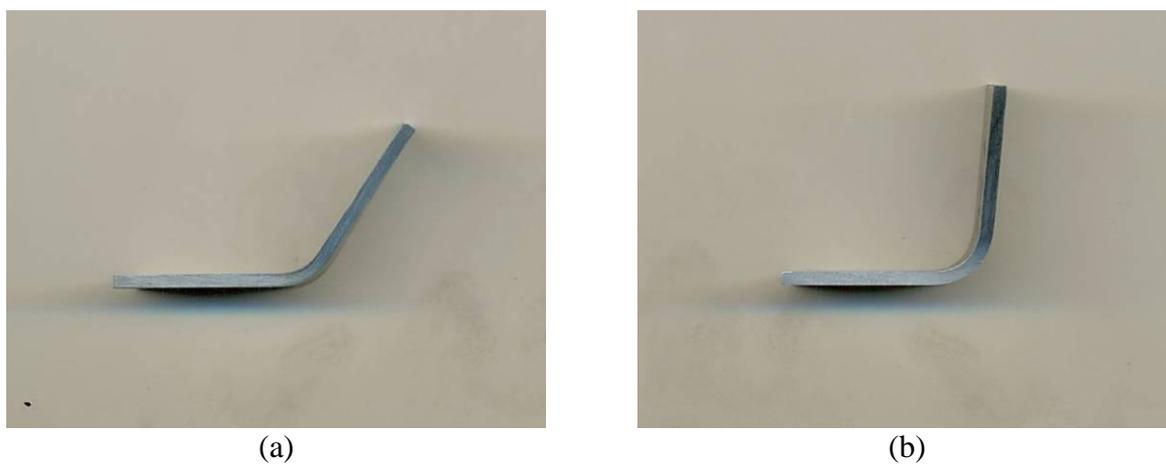


Figura 5.15 – Imagens de corpos de prova de aço inoxidável SAF 2205 no estado como recebido após o dobramento com raio de 6mm – ângulo de dobramento: (a) 60° e (b) 90.

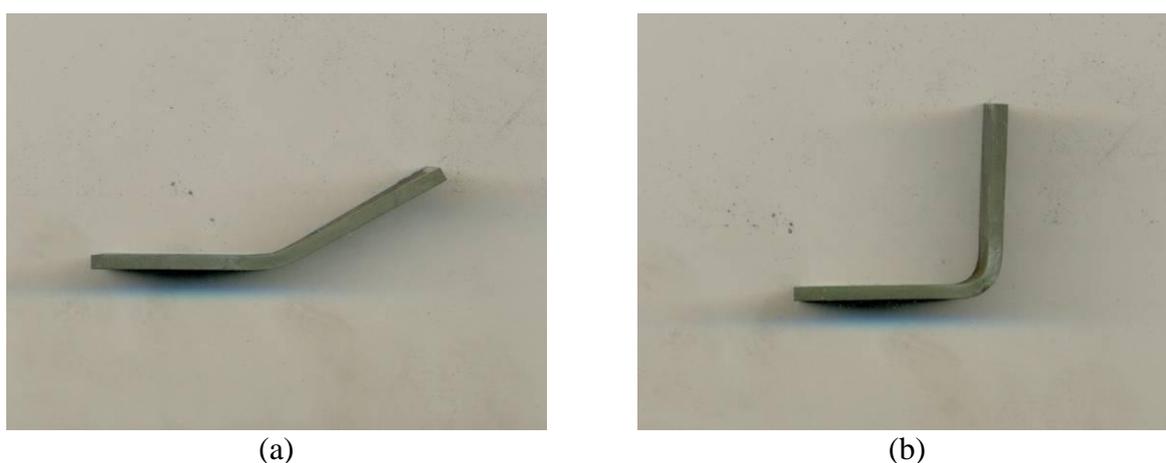


Figura 5.16 – Imagens de corpos de prova de aço inoxidável AISI 304 tratado termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de encharque de 15 minutos após o dobramento com raio de 2mm – ângulo de dobramento: (a) 30° e (b) 90.

Tabela 5.4 – Ângulos de retorno elástico (minutos) no dobramento do aço inoxidável SAF 2205 no estado como recebido.

raio de dobramento	ângulo retorno elástico (minutos)		
	30°	60°	90°
2mm	287,5'	232,5'	340'
4mm	302,5'	202,5'	345'
6mm	180'	255'	367,5'
8mm	227,5'	282,5'	392,5'
10mm	250'	330'	420'

Tabela 5.5 – Ângulos de retorno elástico (minutos) no dobramento do aço inoxidável SAF 2205 tratado termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de 15 minutos.

raio de dobramento	ângulo retorno elástico (minutos)		
	30°	60°	90°
2mm	152,5'	180'	330'
4mm	125'	192,5'	280'
6mm	157,5'	227,5'	285'
8mm	165'	205'	337,5'
10mm	180'	272,5'	365'

Tabela 5.6 – Ângulos de retorno elástico (minutos) no dobramento do aço inoxidável SAF 2205 tratado termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de 60 minutos.

raio de dobramento	ângulo retorno elástico (minutos)		
	30°	60°	90°
2mm	155'	252,5'	235'
4mm	200'	255'	232,5'
6mm	187,5'	327,5'	267,5'
8mm	155'	305'	302,5'
10mm	127,5'	325'	337,5'

Tabela 5.7 – Ângulos de retorno elástico (minutos) no dobramento do aço inoxidável AISI 304 no estado como recebido.

raio de dobramento	ângulo retorno elástico (minutos)		
	30°	60°	90°
2mm	60'	165'	187,5'
4mm	60'	165'	222,5'
6mm	32,5'	195'	220'
8mm	90'	145'	287,5'
10mm	112,5'	215'	305'

Tabela 5.8 – Ângulos de retorno elástico (minutos) no dobramento do aço inoxidável AISI 304 tratado termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de 15 minutos.

raio de dobramento	ângulo retorno elástico (minutos)		
	30°	60°	90°
2mm	52,5'	87,5'	105'
4mm	87,5'	147,5'	102,5'
6mm	95'	175'	177,5'
8mm	82,5'	137,5'	177,5'
10mm	55'	200'	115'

Tabela 5.9 – Ângulos de retorno elástico (minutos) no dobramento do aço inoxidável AISI 304 tratado termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de 60 minutos.

raio de dobramento	ângulo retorno elástico (minutos)		
	30°	60°	90°
2mm	45'	92,5'	50'
4mm	147,5'	122,5'	110'
6mm	102,5'	165'	147,5'
8mm	117,5'	172,5'	165'
10mm	172,5'	177,5'	225'

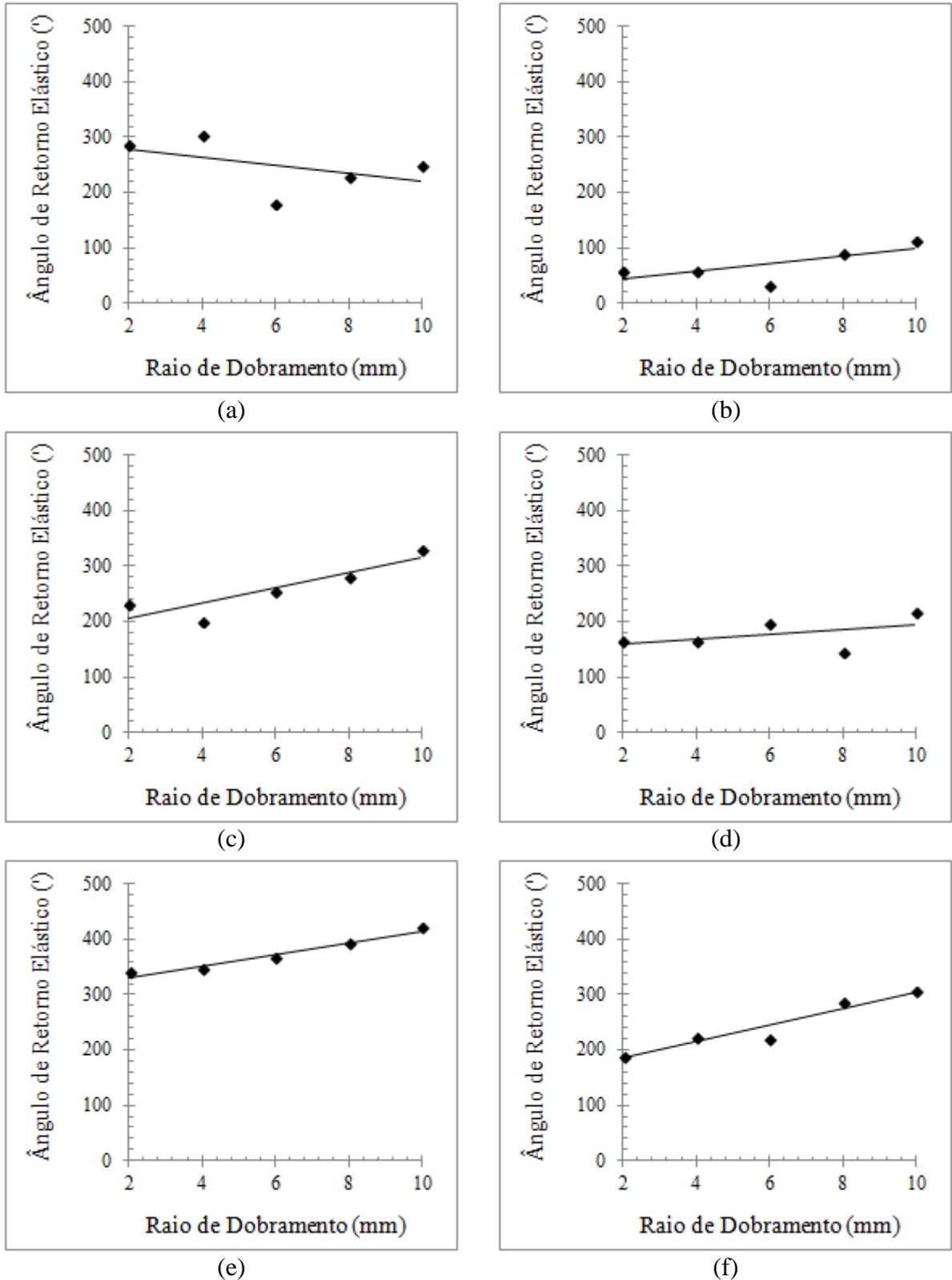


Figura 5.17 – Ângulo de retorno elástico verificado no dobramento dos aços inoxidáveis no estado como recebidos: (a), (c), (e) aço SAF 2205 – dobramento a 30°, 60°, 90°, respectivamente; (b), (d), (f) aço AISI 304 – dobramento a 30°, 60°, 90°, respectivamente.

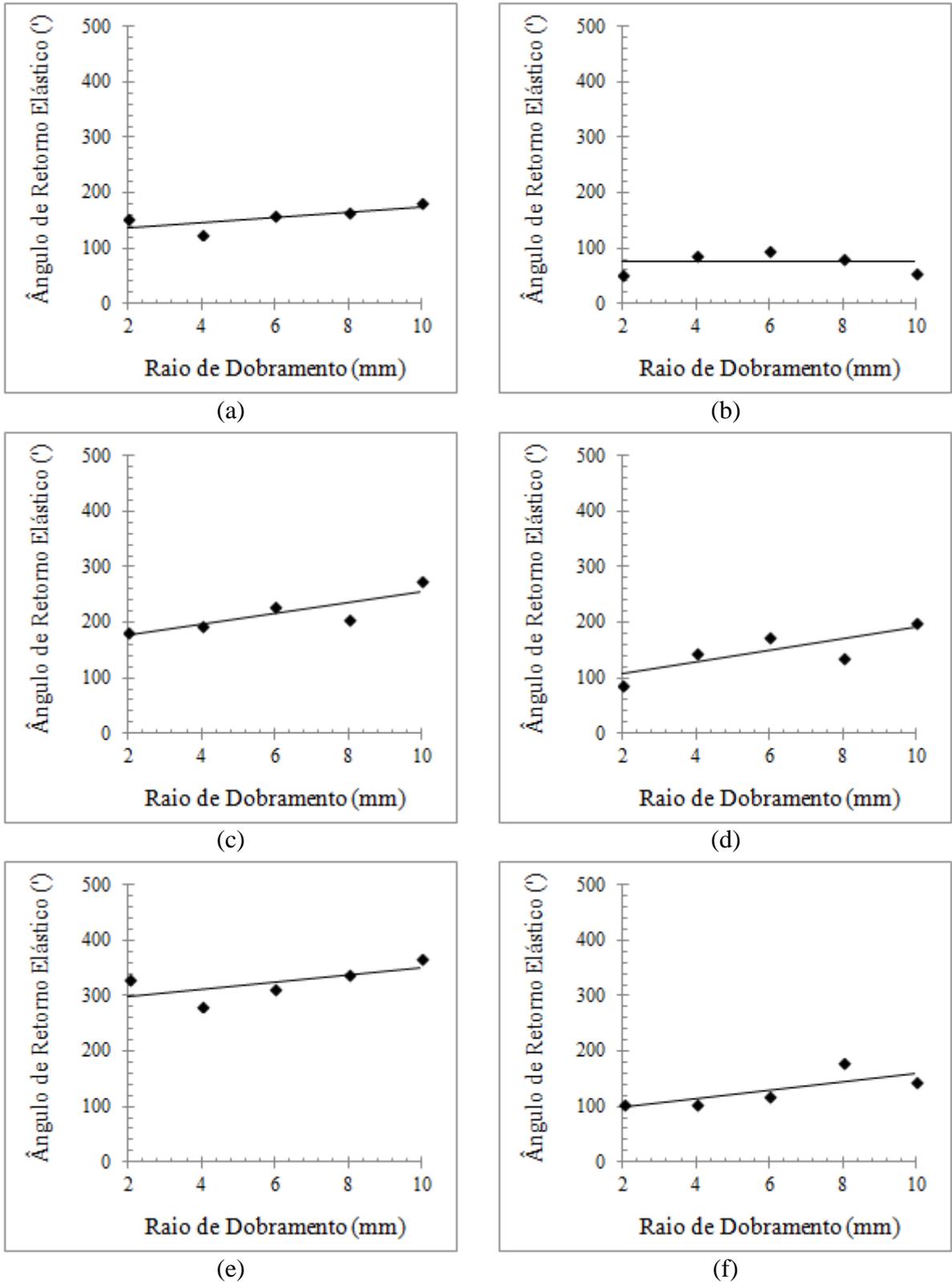


Figura 5.18 – Ângulo de retorno elástico verificado no dobramento dos aços inoxidáveis tratados termicamente a 1050°C por 15 minutos: (a), (c), (e) aço SAF 2205 – dobramento a 30°, 60°, 90°, respectivamente; (b), (d), (f) aço AISI 304 – dobramento a 30°, 60°, 90°, respectivamente.

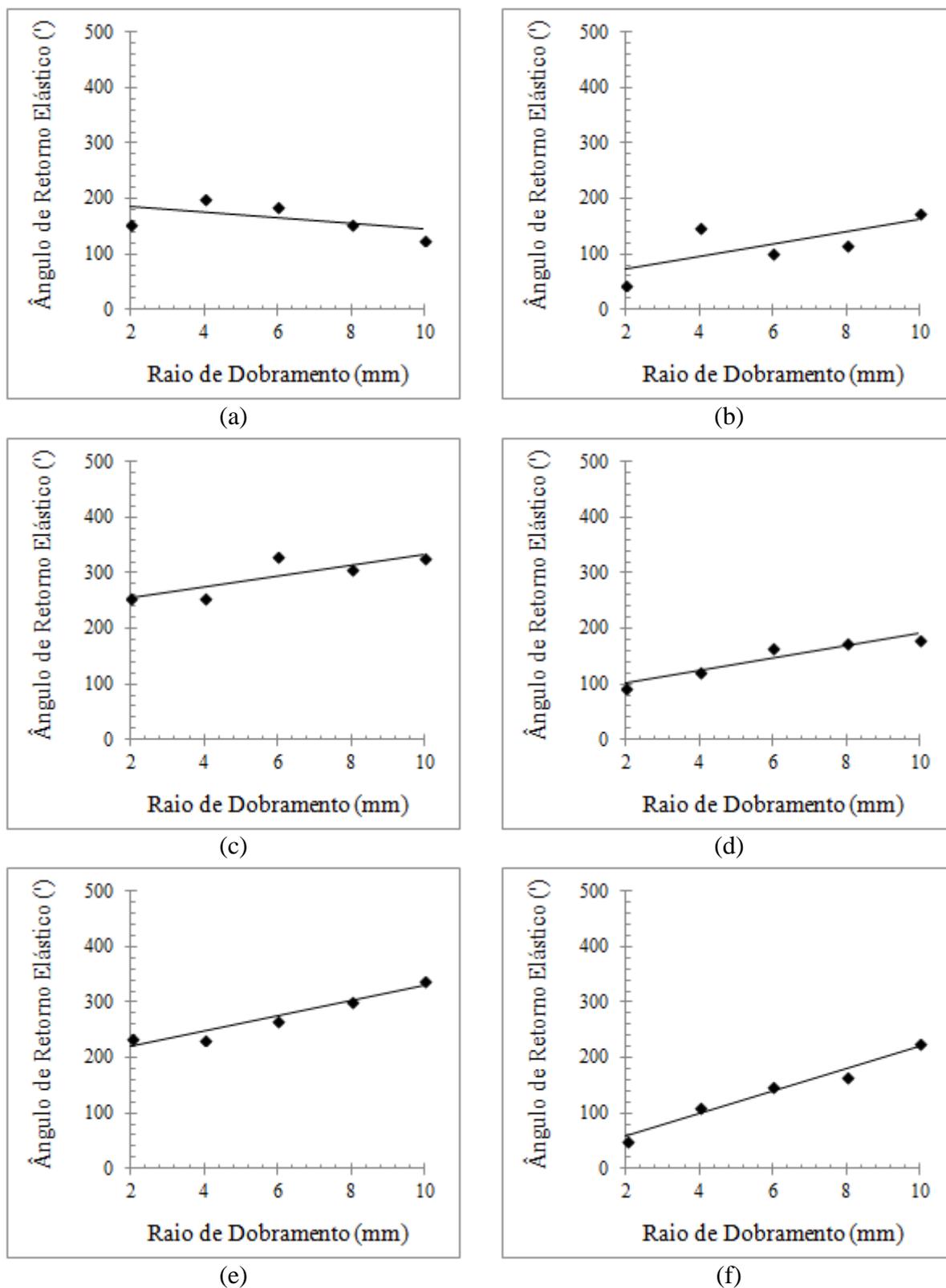


Figura 5.19 – Ângulo de retorno elástico verificado no dobramento dos aços inoxidáveis tratados termicamente a 1050°C por 60 minutos: (a), (c), (e) aço SAF 2205 – dobramento a 30°, 60°, 90°, respectivamente; (b), (d), (f) aço AISI 304 – dobramento a 30°, 60°, 90°, respectivamente.

A influência dos parâmetros de dobramento no fenômeno de recuperação elástica é um fato esperado, sendo continuamente investigado para diferentes materiais e situações. A espessura da chapa, o raio de dobramento, o ângulo de dobramento e a largura da abertura da matriz são apontados como as principais características geométricas da operação a afetar os resultados (INAMDAR et al., 2002; TEKASLAN et al., 2006; ABDULLAH et al., 2012). Considerando a abordagem do presente trabalho, de maneira em geral, os resultados obtidos estão de acordo com a literatura, uma vez que foi observado que o aumento no raio do cutelo levou à elevação na recuperação elástica, similarmente a estudos apresentados anteriormente (TEKASLAN et al., 2006).

Em relação às características do material a ser conformado, o limite de escoamento e o módulo de elasticidade são, em geral, mencionados como os parâmetros mais significativos a afetar o fenômeno de retorno elástico no dobramento (INAMDAR et al., 2002; TEKINER, 2004; TEKASLAN et al., 2006; ABDULLAH et al., 2012). Os trabalhos sugerem que uma diminuição na tensão limite de escoamento levaria a uma redução no efeito mola (DIETER, 1981; TEKINER, 2004). Por outro lado, valores menores de módulo de elasticidade induziriam ao aumento na recuperação elástica. (DIETER, 1981). Os resultados apresentados nas Figuras 5.17 a 5.19 estão de acordo com esses trabalhos. A comparação entre os dados obtidos para os metais como recebidos, afetados pelo encruamento devido à deformação plástica prévia associada ao processo de fabricação das chapas, logo exibindo maiores limites de escoamento (conforme as Tabelas 5.1 a 5.3), com aqueles apresentados pelos materiais tratados termicamente, associados a menores limites de escoamento, evidencia que o decréscimo na tensão citada levou à redução no retorno elástico. Comportamento similar pode ser observado considerando os resultados de recuperação elástica apresentados pelos dois metais. O aço inoxidável AISI 304, nas três condições avaliadas neste trabalho (como recebido e tratado termicamente em duas condições), exibiu valores de limite de escoamento inferiores ao aço inoxidável SAF 2005, assim como ocorreu com o efeito mola.

5.6. Relação entre a Deformação e a Dureza dos Aços Inoxidáveis

Os resultados de dureza Vickers (médios) determinados para as amostras oriundas de diferentes regiões do comprimento útil dos corpos de prova previamente tracionados, nas três condições (como recebidos e tratados termicamente com tempo de encharque de 15 e 60

minutos), são exibidos nas Tabelas 5.10 a 5.15, acompanhados dos valores de deformação associados aos mesmos.

Tabela 5.10 – Valores de deformação real e dureza Vickers das amostras tracionadas de aço inoxidável SAF 2205 no estado como recebidas

aço inoxidável SAF 2205 no estado como recebido							
dureza Vickers	305,3	325,8	332,0	335,0	343,3	349,8	387,3
deformação	0,078	0,188	0,296	0,273	0,408	0,432	0,384

Tabela 5.11 – Valores de deformação real e dureza Vickers das amostras tracionadas de aço inoxidável SAF 2205 tratadas termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de encharque de 15 minutos.

aço inoxidável SAF 2205 tratado a 1050°C por 15 minutos							
dureza Vickers	316,8	318,5	334,0	343,5	347,0	354,2	-
deformação	0,135	0,121	0,201	0,270	0,361	0,361	-

Tabela 5.12 – Valores de deformação real e dureza Vickers das amostras tracionadas de aço inoxidável SAF 2205 tratadas termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de encharque de 60 minutos.

aço inoxidável SAF 2205 tratado a 1050°C por 60 minutos							
dureza Vickers	307,3	313,3	320,5	324,8	329,8	337,8	-
deformação	0,121	0,144	0,180	0,244	0,274	0,366	-

Tabela 5.13 – Valores de deformação real e dureza Vickers das amostras tracionadas de aço inoxidável AISI 304 no estado como recebidas

aço inoxidável AISI 304 no estado como recebido							
dureza Vickers	408,3	413,5	414,3	418,5	424,3	-	-
deformação	0,328	0,359	0,502	0,392	0,367	-	-

Tabela 5.14 – Valores de deformação real e dureza Vickers das amostras tracionadas de aço inoxidável AISI 304 tratadas termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de encharque de 15 minutos.

aço inoxidável AISI 304 tratado a 1050°C por 15 minutos							
dureza Vickers	389,8	391,5	400,5	406,3	410,8	-	-
deformação	0,371	0,379	0,431	0,466	0,390	-	-

Tabela 5.15 – Valores de deformação real e dureza Vickers das amostras tracionadas de aço inoxidável AISI 304 tratadas termicamente com temperatura de 1050°C e tempo de encharque de 60 minutos.

aço inoxidável AISI 304 tratado a 1050°C por 60 minutos							
dureza Vickers	403,8	404,8	405,5	418,0	420,5	-	-
deformação	0,384	0,423	0,372	0,476	0,534	-	-

Na Figura 5.20 são apresentados os gráficos relativos às tabelas anteriores, acompanhados das linhas de tendência e das expressões relacionando a deformação real ϵ_R à dureza HV determinadas para os mesmos, obtidas através de regressão de potência. Ressalta-se que se optou por este tipo de regressão por ser aquela tipicamente empregada nos trabalhos que abordam o estudo da deformação plástica em processos de conformação mecânica através da técnica dos perfis de microdureza.

Nota-se que, em geral, para os três estados iniciais antes da tração, material como recebido e tratado termicamente em duas condições, em termos de deformação real, o aço inoxidável SAF 2205 parece ser mais sensível a variações nos valores de dureza considerando o método experimental utilizado. Dessa forma, observa-se que alterações menos pronunciadas nos valores de dureza afetam de forma mais acentuada o aço inoxidável duplex que o aço inoxidável austenítico investigado. Verifica-se também que, para as condições investigadas, o aço inoxidável AISI 304 apresentou maior dispersão nos resultados, levando a um ajuste na curva, com exceção de uma condição, aparentemente menos preciso.

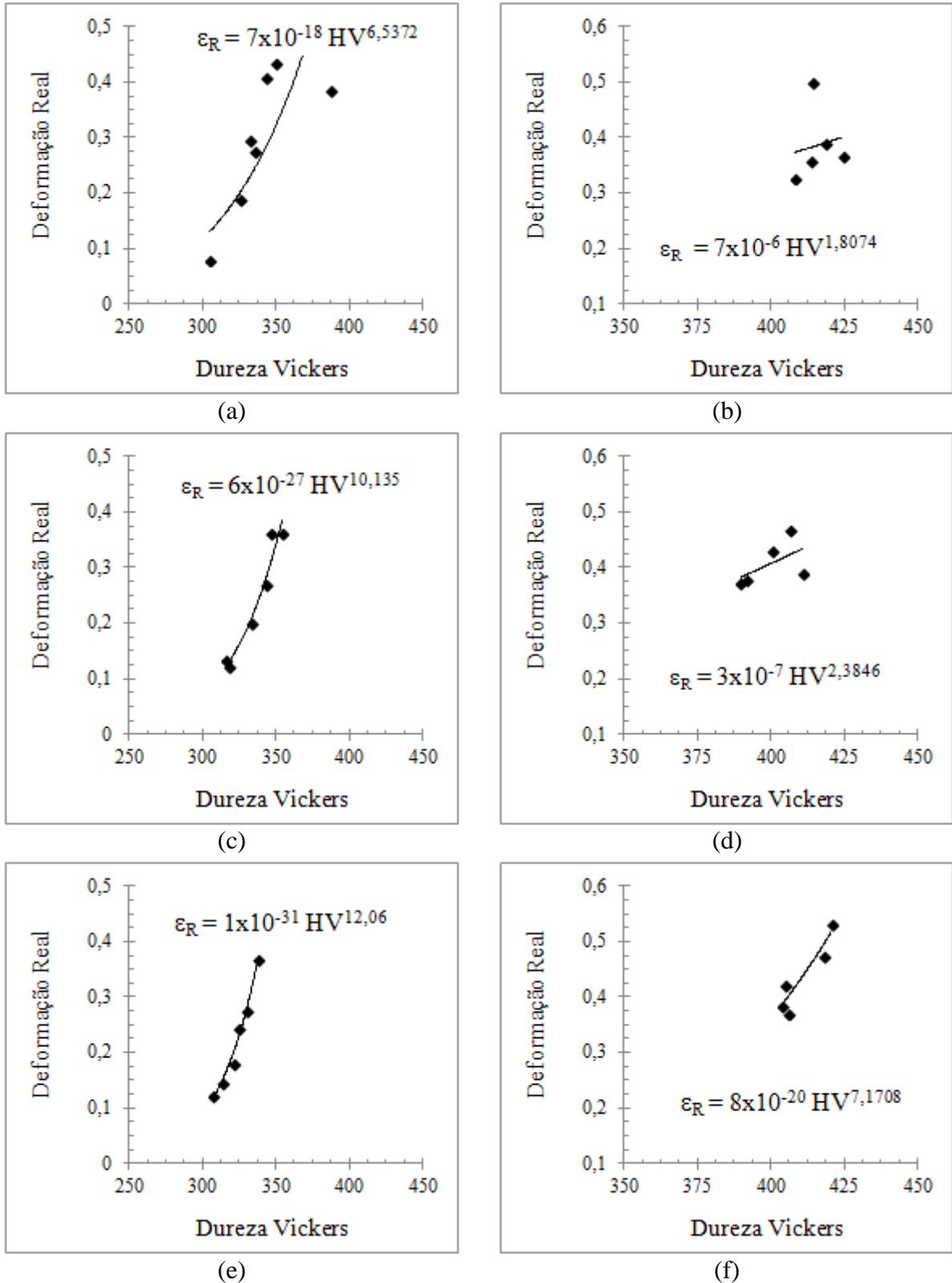


Figura 5.20 – Relação entre a deformação e a dureza Vickers para os aços: (a), (c), (e) SAF 2205 como recebido, tratado a 1050°C por 15 minutos e tratado a 1050°C por 60 minutos, respectivamente; (b), (d), (f) AISI 304 como recebido, tratado a 1050°C por 15 minutos e tratado a 1050°C por 60 minutos, respectivamente

5.7. Distribuição de Deformação nos Aços Inoxidáveis após o Dobramento

Os resultados obtidos nos ensaios de dureza Vickers ao longo da seção transversal dos corpos de prova após o dobramento com ângulo de 90° e raios de 2mm e 4mm são mostrados nas Tabelas 5.16 e 5.17 para o aço inoxidável SAF 2205 e nas Tabelas 5.18 e 5.19 para o aço inoxidável AISI 304. Nota-se que, conforme a Figura 4.31, os ensaios foram conduzidos na linha central ao raio de dobramento, perpendicularmente à espessura dos corpos de prova. A localização exata dos testes está apresentada com a designação posição 1, posição 2 etc. As posições 1 e 5 se referem às regiões mais próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente. A posição 3 está localizada no centro do corpo de prova em termos de espessura e as posições 2 e 4 entre a região central e as posições 1 e 5, respectivamente.

Tabela 5.16 – Valores de dureza Vickers do aço inoxidável SAF 2205 como recebido após dobramento com ângulo de 90° e raios de 2mm e 8mm de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente).

aço inoxidável SAF 2205 no estado como recebido após dobramento										
	ângulo = 90° e raio = 2mm					ângulo = 90° e raio = 8mm				
posição	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
dureza Vickers	325	271	280	315	327	306	291	270	277	305

Tabela 5.17 – Valores de dureza Vickers do aço inoxidável SAF 2205 tratado a 1050°C por 15 minutos após dobramento com ângulo de 90° e raios de 2mm e 8mm de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente).

aço inoxidável SAF 2205 tratado a 1050°C por 15 minutos										
	ângulo = 90° e raio = 2mm					ângulo = 90° e raio = 8mm				
posição	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
dureza Vickers	315	310	289	273	303	301	285	268	264	294

Tabela 5.18 – Valores de dureza Vickers do aço inoxidável AISI 304 como recebido após dobramento com ângulo de 90° e raios de 2mm e 8mm de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente).

aço inoxidável AISI 304 no estado como recebido após dobramento										
	ângulo = 90° e raio = 2mm					ângulo = 90° e raio = 8mm				
posição	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
dureza Vickers	287	244	213	187	243	284	275	237	229	245

Tabela 5.19 – Valores de dureza Vickers do aço inoxidável AISI 304 tratado a 1050°C por 15 minutos após dobramento com ângulo de 90° e raios de 2mm e 8mm de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente).

aço inoxidável AISI 304 tratado a 1050°C por 15 minutos										
	ângulo = 90° e raio = 2mm					ângulo = 90° e raio = 8mm				
posição	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
dureza Vickers	234	236	207	184	211	237	222	213	198	234

Os dados anteriores mostram que, independentemente da posição, da condição do material e do raio de dobramento, o aço inoxidável SAF 2205 apresentou dureza superior ao aço inoxidável ASI 304. Esse fato era, de certa forma, esperado, uma vez que a resistência mecânica do aço inoxidável duplex, observada através dos limites de escoamento e de resistência determinados nos dos ensaios de tração (Tabelas 5.1 a 5.3), se mostrou superior à resistência mecânica do aço inoxidável austenítico. Para ambos os materiais, conforme esperado, a dureza dos corpos de prova tratados termicamente e dobrados foi inferior à dureza das peças apenas dobradas, no estado como recebidas, novamente em conformidade com os testes de tração cujos resultados foram apresentados anteriormente, visto que as últimas estavam encruadas, ainda com os efeitos da operação de deformação plástica empregada na fabricação.

Nas Figuras 5.21 a 5.24 são exibidos os gráficos de distribuição de dureza ao longo da seção transversal dos corpos de prova. Para os dois metais e todas as condições de dobramento, nota-se a ocorrência de perfis de dureza heterogêneos, conforme esperado. Considerando inicialmente o aço inoxidável SAF 2205 (Figura 5.21 e 5.22), verifica-se que os valores de dureza foram superiores nas regiões mais próximas às superfícies externa e interna de dobramento, não sendo observadas diferenças significativas entre os resultados das duas posições. A ocorrência de valores de dureza Vickers mais elevados nestas regiões está certamente relacionada ao fato de que a deformação na operação deverá ser mais acentuada à medida que se aproxima das superfícies da chapa dobrada.

Similarmente ao aço inoxidável duplex, o aço inoxidável AISI 304 também apresentou resultados de dureza superiores nas regiões próximas às superfícies do corpo de prova (Figuras 5.23 e 5.24). Entretanto, para esta liga, observa-se claramente que a superfície externa se tornou mais resistente após o ensaio de dobramento. Além disso, para todas as situações analisadas, a posição 4, intermediária entre a posição central e a posição próxima à superfície interna de dobramento, foi aquela que exibiu menores níveis de dureza. Por fim, nota-se que para esse aço, maior heterogeneidade na distribuição de dureza é observada nas amostras dobradas no estado como recebidas.

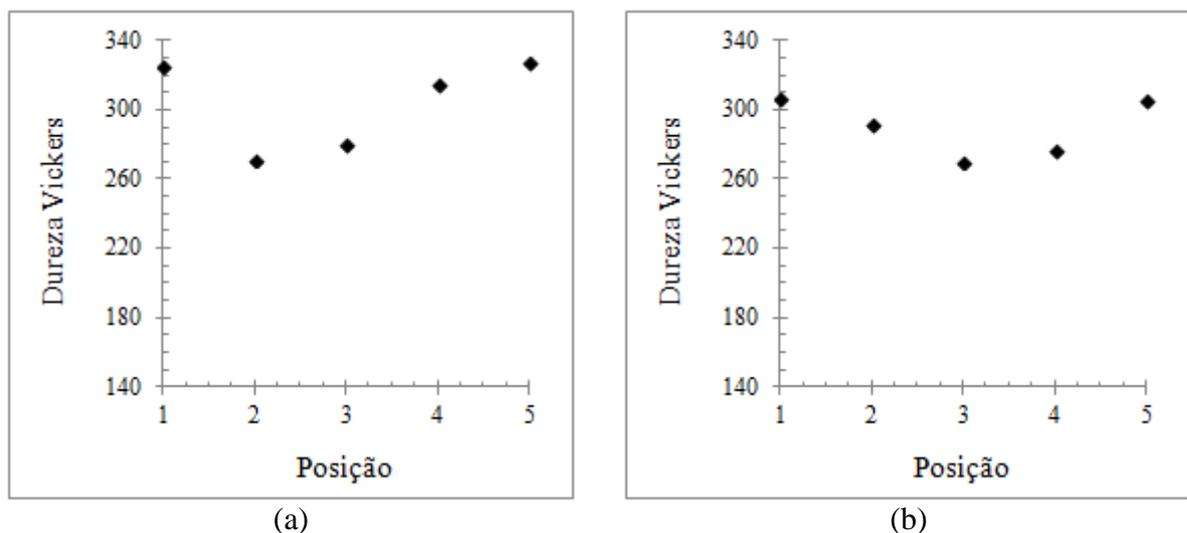


Figura 5.21 – Distribuição de dureza Vickers no aço inoxidável SAF 2205 como recebido após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio = 8mm.

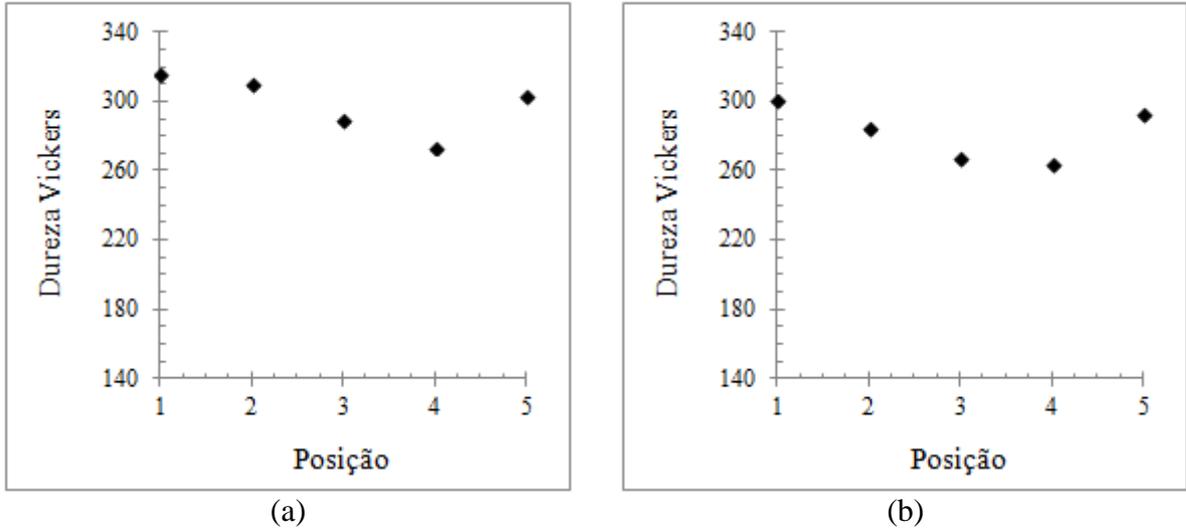


Figura 5.22 – Distribuição de dureza Vickers no aço inoxidável SAF 2205 tratado a 1050°C por 15 minutos após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio = 8mm.

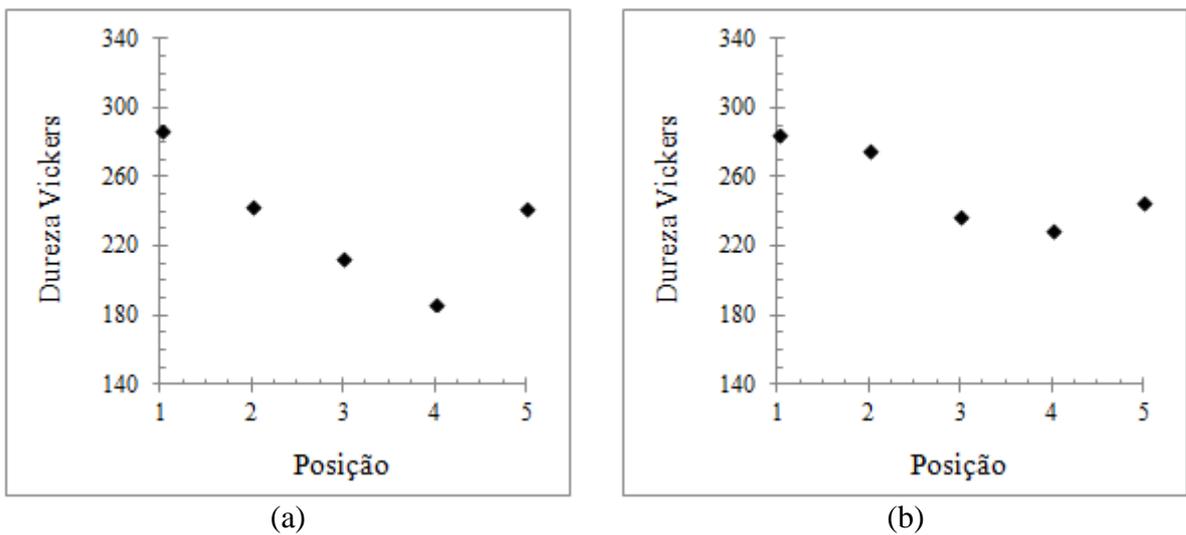


Figura 5.23 – Distribuição de dureza Vickers no aço inoxidável AISI 304 como recebido após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio = 8mm.

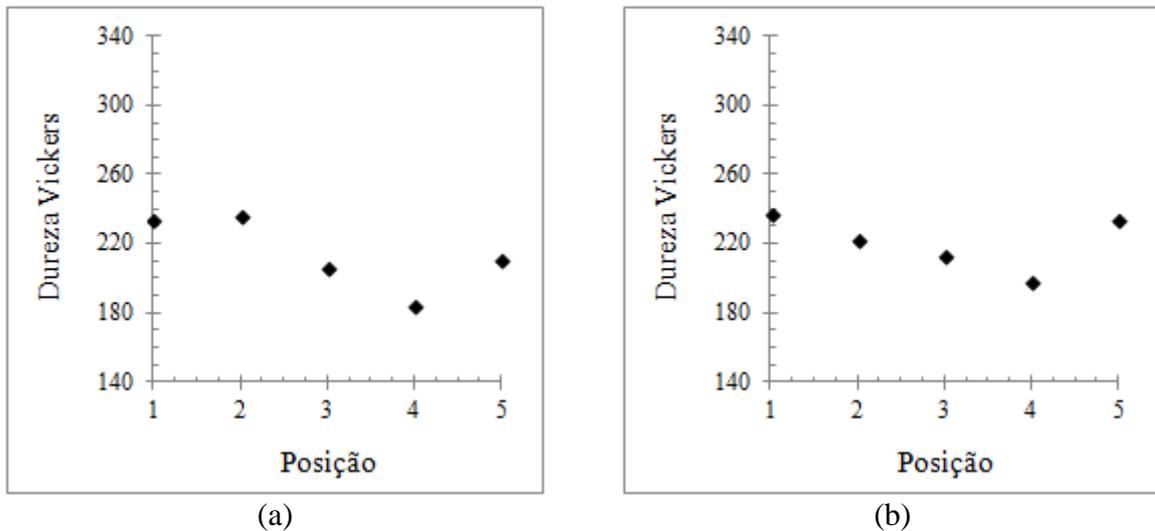


Figura 5.24 – Distribuição de dureza Vickers no aço inoxidável AISI 304 tratado a 1050°C por 15 minutos após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio = 8mm.

As distribuições de deformação ao longo da seção transversal dos materiais determinadas a partir dos resultados de microdureza apresentados nas Figuras 5.21 a 5.24 e das expressões $\epsilon_R - HV$ exibidas na Figura 5.20 são mostradas nas Figuras 5.25 a 5.28. Similarmente aos perfis de dureza, as distribuições de deformação real dos aços inoxidáveis após dobramento são não homogêneas. Essa heterogeneidade parece ser um pouco mais acentuada para ambos os metais no estado como recebidos e, dentre os dois, mais pronunciada para o aço inoxidável SAF 2205. Esse último fenômeno não foi observado de maneira clara para os perfis de microdureza. Entretanto, conforme apresentado na Figura 5.20 e discutido anteriormente, o aço inoxidável SAF 2205 parece ser mais sensível a variações nos valores de dureza considerando o método experimental utilizado no trabalho. Dessa forma, alterações relativamente suaves nos valores de dureza deste aço implicaram em mudanças significativas nos resultados de deformação. Verifica-se ainda que, para os dois materiais, a heterogeneidade na deformação parece diminuir com o valor do raio de dobramento e com a realização do tratamento térmico. Por fim, os níveis de deformação para cada região ou posição são mais acentuados para o aço inoxidável AISI 304.

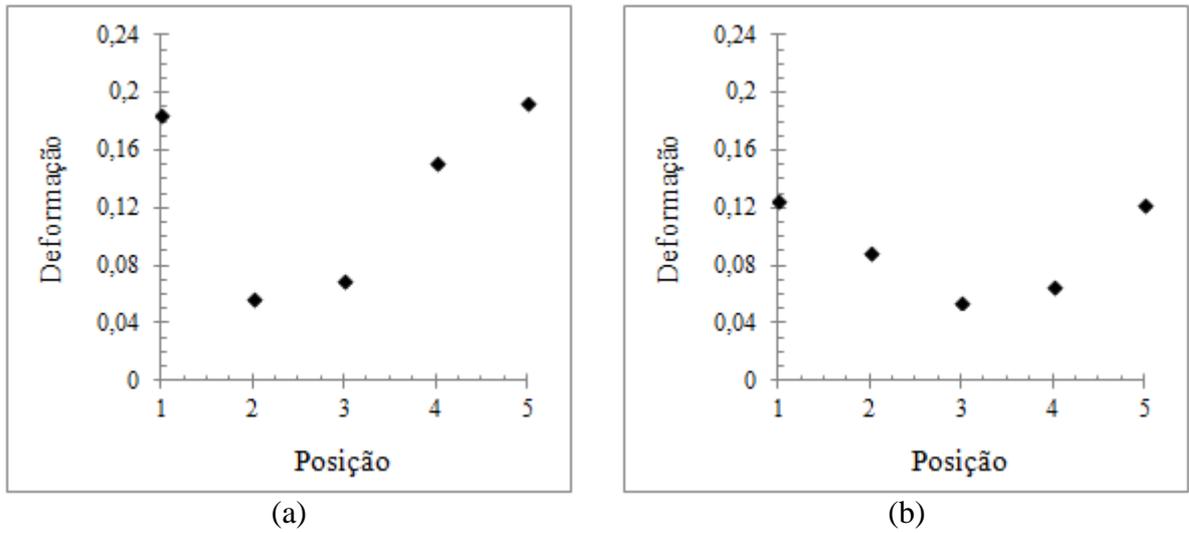


Figura 5.25 – Distribuição de deformação no aço inoxidável SAF 2205 como recebido após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio = 8mm.

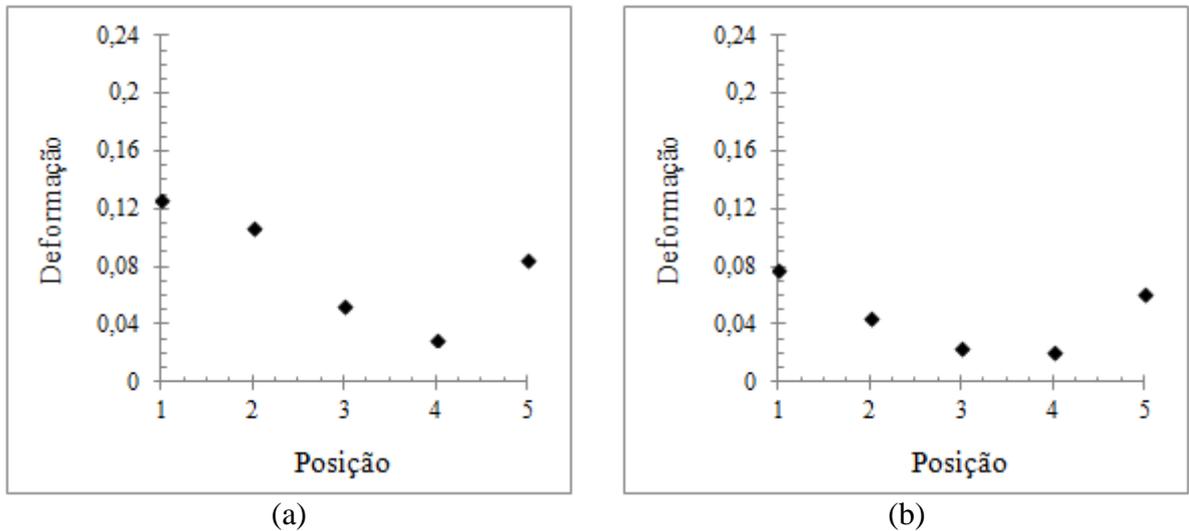


Figura 5.26 – Distribuição de deformação no aço inoxidável SAF 2205 tratado a 1050°C por 15 minutos após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio = 8mm.

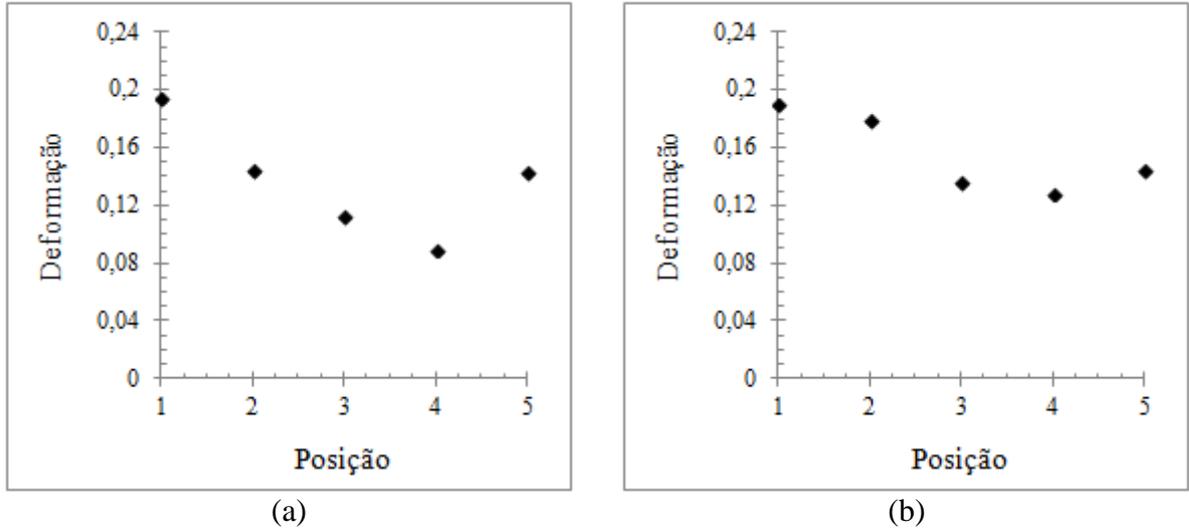


Figura 5.27 – Distribuição de deformação no aço inoxidável AISI 304 como recebido após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio = 8mm.

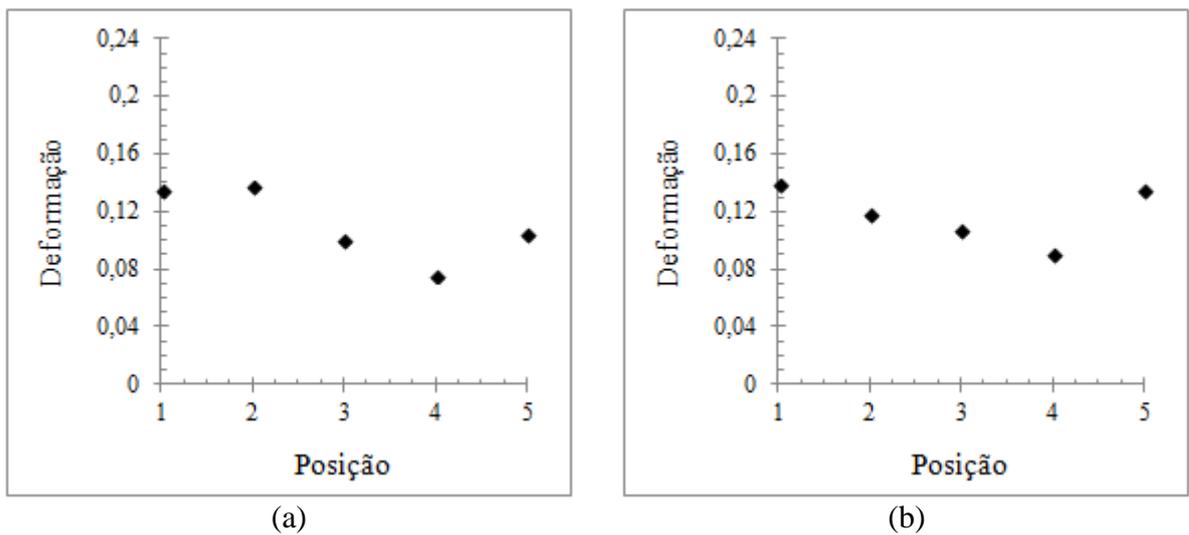


Figura 5.28 – Distribuição de deformação no aço inoxidável AISI 304 tratado a 1050°C por 15 minutos após dobramento com ângulo de 90° de acordo com a posição (1 e 5: próximas às superfícies externa e interna de dobramento, respectivamente): (a) raio = 2mm e (b) raio = 8mm.

6. CONCLUSÕES

- Dispositivos consistindo em duas matrizes em V, cinco cutelos e um adaptador foram projetados e confeccionados de forma a possibilitar a realização de dobramento de chapas metálicas envolvendo variáveis diversas, como diferentes ângulos, raios de cutelo e aberturas de matriz.
- Não foi observada ocorrência de trincas nos aços inoxidáveis SAF 2205 e AISI 304 nas condições estruturais, ou seja, no estado como recebidos e após a realização de dois tratamentos térmicos, e de dobramento investigadas, envolvendo três ângulos e cinco raios de cutelo.
- De maneira geral, para ambos os materiais metálicos empregados no trabalho, independente da condição prévia ao ensaio, ou seja, das características microestruturais das ligas, o fenômeno de recuperação elástica aumentou com o raio do cutelo e com o ângulo de dobramento.
- O aço inoxidável SAF 2205 exibiu níveis de retorno elástico, quantificados através ângulo de retorno elástico, calculado a partir da diferença entre o ângulo de dobramento desejado e o ângulo final obtido, mais elevados que o aço inoxidável AISI 304, fenômeno relacionado ao seu limite de escoamento.
- O aço inoxidável SAF 2205 se mostrou mais sensível a variações nos valores de dureza que o aço inoxidável AISI 304 nas três condições analisadas, considerando o método experimental utilizado para determinação da deformação real a partir de amostras apenas tracionadas.
- Ambos os materiais estudados, nas condições abordadas no trabalho, exibiram distribuições tanto de dureza como de deformação heterogêneas.
- Os níveis de dureza e de deformação mais elevados ocorreram nas regiões próximas às superfícies externa e interna de dobramento das chapas de aço inoxidável SAF 2205 e aço inoxidável SAF 2205.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o comportamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2005 mediante outras condições de dobramento, tais como diferentes larguras de abertura da matriz em V, presença de raio próximo à abertura em V, tempos de aplicação de esforços distintos, dentre outros.
- Analisar a ocorrência do fenômeno de transformação martensítica por deformação plástica no dobramento de chapas de aço inoxidável AISI 304.
- Estudar os efeitos da formação de fases intermetálicas em função da realização de tratamentos térmicos anteriores no dobramento de chapas de aço inoxidável SAF 2205.
- Analisar o comportamento de outros materiais metálicos, com distintas características de encruamento, nos ensaios de dobramento.

8. REFERÊNCIAS

ABDULLAH, A. B.; SAPUAN, S. M.; SAMAD, Z.; AZIZ, N. A. A comprehensive review of experimental approaches used in the measurement of springback. **Advances in Natural and Applied Sciences**, v. 2, n. 2, p. 195-205, 2012.

ASM HANDBOOK. **Mechanical testing and evaluation**. Ohio: ASM International, 2000. 998p.

ASM HANDBOOK. **Metallography and microstructures**. Ohio: ASM International, 2004. 1184p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING METALS. **ASTM E8**: standard test method for tension testing of metallic materials. Pennsylvania, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING METALS. **ASTM E290**: standard test methods for bend testing of material for ductility. Pennsylvania, 2009.

BACKOFEN, W.A. **Deformation processing**. Massachusetts: Addison Wesley Reading, 1972. 326p.

BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T. **Conformação plástica dos metais**. 6 ed (1 digital). Campinas: EPUSP, 2011. 258p.

CETLIN, P.R. Redundant deformation factor evaluation through the hardness profile method in round section bar drawing. **Journal of Engineering Materials and Technology**. v. 106, p. 147-151, 1984.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005. 599p.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Blücher, 2008. 672p.

CORRÊA, E. C. S. **Aspectos do encruamento de metais previamente deformados a frio**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004, 233p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

COUTINHO, C. B. **Materiais metálicos para engenharia**. Belo Horizonte: FCO, 1992. 405p.

DE, A. K.; MURDOCK, D. C.; MATAYA, M. C.; SPEER, J. G.; MATLOCK, D. K. Quantitative measurement of deformation-induced martensite in 304 stainless steel by X-ray diffraction. **Scripta Materialia**, v. 50, p. 1445-1449, 2004.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653p.

DURAND-CHARRE, M. **Microstructure of steels and cast irons**. Berlin: Springer, 2004. 417p.

ESCRIBA, D. M.; MATERNA-MORRIS, E.; PLAUT, R. L.; PADILHA, A. F. Chi-phase precipitation in a duplex stainless steel. **Materials Characterization**, v.60, p. 1214-1219, 2009.

FARGAS, G.; ANGLADA, M.; MATEO, A. Effect of the annealing temperature on the mechanical properties, formability and corrosion resistance of hot-rolled duplex stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 1770-1782, 2009.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 247p.

INAMDAR, M. V.; DATE, P. P.; SABNIS, S. V. On the effects of geometric parameters on springback in sheets of five materials subjected to air vee bending. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 123, p. 459-463, 2002.

LEE, K. M.; CHO, H. S.; CHOI, D. C. Effect of isothermal treatment of SAF 2205 duplex stainless steel on migration of δ/γ interface boundary and growth of austenite. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 285, p. 156-161, 2009.

LOPES, W. **Estudo do encruamento dos aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. 186p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J. L.; HU, S. J. **Mechanics of sheet metal forming**. 2 ed. Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 2002. 211p.

MARTINS, M.; FORTI, L. R. N. Effect of aging on impact properties of ASTM A890 Grade 1C super duplex stainless steel. **Materials Characterization**, v. 59, p. 162-166, 2008.

MICHALSKA, J.; SOZANSKA, M. Qualitative and quantitative analysis of σ and χ phases in 2205 duplex stainless steel. **Materials Characterization**, v. 56, p. 355-362, 2006.

OLIVEIRA, M. C.; ALVES, J. L.; CHAPARRO, B. M.; MENEZES, L. F. Study on the influence of work-hardening modeling in springback prediction. **International Journal of Plasticity**, v. 23, p. 516-543, 2007.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. **Aços inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades**. São Paulo: Hemus, 1994. 170p.

PADILHA, A. F.; RIOS, P. R. Decomposition of austenite in austenitic stainless steels. **ISIJ International**, v. 42, n. 4, p. 325-337, 2002.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010. 648p.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5 ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1982. 286p.

TEKASLAN, O.; SEKER, U.; OZDEMIR, A. Determining springback amount of steel sheet metal has 0.5mm thickness in bending dies. **Materials and Design**, v. 27, p. 251-258, 2006.

TEKINER, Z. An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 145, p. 109-117, 2004.

TOROS, S.; ALKAN, M.; ECE, E.; OZTURK, F. Effect of pre-straining on the springback behavior of the AA5754-0 alloy. **Materials and Technology**, v. 45, n. 6, p. 613-618, 2011.