

Damien Augusto Chaves

**PROJETO DE PRODUÇÃO DE LÂMINAS BIMETÁLICAS POR
CO-LAMINAÇÃO**

Orientador: Dr. Ronald Lesley Plaut

São Paulo 2010

"A música é a revelação superior a toda a sabedoria e filosofia"

Beethoven

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Manoel e Miriam, pelo carinho e dedicação durante todos estes anos; à minha irmã Karen por ter sido sempre uma boa amiga; aos meus avós Humberto, Alice, Celso e Maria por todos os momentos de alegria vividos constantemente durante toda a minha infância; ao Sr. Bodinho pelos momentos de amizade.

Ao Dr. Marcelo Gonçalves pela confiança e por todo aprendizado que obtive durante todos estes meses de estágio no Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

À amiga Engenheira Ana Paola Villalva Braga pela constante colaboração com o projeto, pelos ensinamentos e pelos momentos de descontração.

À empresa Brasmetal Waelzholz por todo o trabalho desenvolvido, pelo apoio durante o desenvolvimento do trabalho experimental e por disponibilizar os materiais ensaiados.

À Sandra Munarim, pela atenção durante todo o procedimento experimental e pelos ensinamentos técnicos.

Ao Dr. Antenor Ferreira Filho por ter colaborado diretamente com o projeto e pelas valiosas discussões sobre o planejamento e direcionamento dos estudos.

Ao Israel, pela paciência e ajuda prestada na realização do ensaio mecânico de dobramento.

Ao Dr. Ronald Lesley Plaut, por ter me orientado durante a realização dos ensaios e pelas sugestões para os relatórios referentes ao trabalho de formatura.

Por fim, gostaria de dedicar este trabalho ao meu avô Celso, que sempre confiou em mim, e que com seu jeito singelo me mostrou que a vida nem sempre deve ser levada tão a sério. Agradeço a Deus por ter me proporcionado tantos momentos felizes ao lado de minha família.

Resumo

Um estudo de produção de lâminas bimetálicas por co-laminação foi realizado laminando-se um aço ferramenta sobre um aço base de diferentes composições. Foram feitas laminações com variação nos parâmetros com os produtos testados por meio de ensaios mecânicos de dobramento. Os melhores resultados configuraram o grau de redução e temperatura de laminação ideais para a produção dessas lâminas. Alguns protótipos de lâminas de corte basais para máquinas colheitadeiras de cana de açúcar foram produzidos e testados em campo. A adesão entre os componentes teve desempenho satisfatório em quase todas as solicitações, e os defeitos evidenciados em certas regiões da interface bimetálica, por microscopia óptica e eletrônica de varredura, tiveram sua causa e origem identificada para futuros melhoramentos.

Abstract

A study on the production of bi-metallic blades by rolling simultaneously a tool steel and a base steel alloy have been developed. The roll bonded plates have been made by ranging different parameters, like rolling temperature and reduction, in order to reach a good level of quality. The plate quality is approved by bend testing and by microanalysis of the bi-metallic interface. The best result defines the best rolling temperature and reduction level for the production of these blades. The bond between the components has shown good resistance and some defects that were found along the bi-metallic interface have been studied and identified for future improvements.

Lista de Figuras

<u>Figura 1.1</u> Lâmina de corte basal para colheitadeiras de cana de açúcar com espessura desejada.....	10
<u>Figura 1.2</u> Foto de uma colheitadeira de cana de açúcar.....	12
<u>Figura 2.1</u> Desenho esquemático para soldagem por difusão.....	16
<u>Figura 2.2</u> Força envolvida na aproximação de dois átomos.....	18
<u>Figura 2.3</u> Esquema de camadas superficiais em um material metálico.....	19
<u>Figura 2.4</u> Pontos de adesão em duas chapas co-laminadas.....	20
<u>Figura 4.1</u> Esquema de montagem da amostra 1.....	21
<u>Figura 4.2</u> Esquema de montagem das amostras para chapas 2, 3, 4, 5 e 6	26
<u>Figura 4.3</u> Esquema de montagem das amostras para chapas 7, 8, 9, 10 e 11	27
<u>Figura 4.4</u> Forno EDG utilizado durante a laminação.....	29
<u>Figura 4.5</u> Laminador reversível utilizado.....	30
<u>Figura 4.6</u> Laminador reversível utilizado.....	31
<u>Figura 4.7</u> Esquema da preparação de amostras para a chapa 1.....	36
<u>Figura 4.8</u> Esquema da preparação de amostras para a chapa 2, 3, 4, 5 e 6.....	38
<u>Figura 4.9</u> Esquema da preparação de amostras para a chapa 7, 8, 9, 10 e 11.....	39
<u>Figura 4.10</u> Aparelho utilizado para microdureza.....	40
<u>Figura 4.11</u> Medição de microdureza.....	41
<u>Figura 4.12</u> Medição de microdureza para o caso de descarbonetação	41
<u>Figura 4.13</u> Ensaio mecânico de cisalhamento.....	42
<u>Figura 4.14</u> Ilustração das dimensões de uma amostra para o ensaio de cisalhamento.....	42
<u>Figura 4.15</u> Vistas ortográficas da ferramenta utilizada no ensaio de dobramento.....	44
<u>Figura 4.16</u> Vista em perspectiva do punção utilizado no ensaio de dobramento.....	45
<u>Figura 4.17</u> Esquema do ensaio de dobramento.....	46
<u>Figura 4.18</u> Prensa utilizada no ensaio de dobramento.....	47
<u>Figura 4.19</u> Exemplo de protótipo produzido para teste em campo.....	48
<u>Figura 5.1</u> Foto em microscópio óptico da interface da chapa 1.....	53
<u>Figura 5.2</u> Foto em microscópio óptico da borda direita da primeira amostra laminada.....	54
<u>Figura 5.3</u> Foto em microscópio óptico com esquema do corte efetuado para formar o fio da lâmina.....	55
<u>Figura 5.4</u> Foto em microscópio óptico do limite da região bimetalica	56
<u>Figura 5.5</u> Foto em microscópio óptico que mostra a microestrutura do aço base depois da laminação.....	57
<u>Figura 5.6</u> Foto em microscópio óptico que mostra a microestrutura do aço D6A depois da laminação.....	58
<u>Figura 5.7</u> Foto em microscópio óptico que mostra a interface limpa do lado esquerdo da chapa 3.....	59
<u>Figura 5.8</u> Contaminação de 150 mm evidenciada em uma montagem realizada para a chapa 5 com algumas fotos em microscópio óptico.....	60
<u>Figura 5.9</u> Foto em microscópio óptico que mostra a contaminação na borda direita da chapa 6.....	61
<u>Figura 5.10</u> Configuração da interface tripla e contaminação localizada na borda direita da chapa 6.....	61
<u>Figura 5.11</u> Imagem de elétrons secundários em MEV da contaminação localizada na borda direita da chapa 6.....	62

<u>Figura 5.12</u> Foto em microscópio óptico de contaminação atípica na amostra 6.....	63
<u>Figura 5.13</u> Fratura no aço inox próxima a interface tripla da chapa 6.....	64
<u>Figura 5.14</u> Interface tripla na borda esquerda da chapa 4.....	65
<u>Figura 5.15</u> Relação entre espessuras dos componentes da região bimetalica.....	66
<u>Figura 5.16</u> Imagem em microscópio óptico para amostra da chapa com redução de 60% e temperatura de laminação de 1000°C.....	67
<u>Figura 5.17</u> Imagem em microscópio óptico para amostra da chapa com redução de 60% e temperatura de laminação de 1100°C.....	67
<u>Figura 5.18</u> Imagem em microscópio óptico para amostra da chapa com redução de 80% e temperatura de laminação de 1100°C.....	68
<u>Figura 5.19</u> Imagem em microscópio óptico para amostra da chapa com redução de 30% e temperatura de laminação de 1100°C.....	68
<u>Figura 5.20</u> Imagem em microscópio óptico para amostra da chapa com redução de 60% e temperatura de laminação de 900°C.....	69
<u>Figura 5.21</u> Imagem em mciroscópio eletrônico de varredura da interface tripla central.....	76
<u>Figura 5.22</u> Imagem em mciroscópio eletrônico de varredura da interface tripla central.....	76
<u>Figura 5.23</u> Resultado de EDS realizado para contaminação da amostra A2 Chapa 1.....	77
<u>Figura 5.24</u> Resultado de EDS realizado para contaminação da amostra A2 Chapa 1 sobre área.....	77
<u>Figura 5.25</u> Resultado de EDS realizado em linha pela interface para a chapa 1.....	80
<u>Figura 5.26</u> Imagem utilizada para criar resultado de EDS realizado em linha.....	81
<u>Figura 5.27</u> Chapas testadas no ensaio de dobramento ;Chapas 7, 8, 9, 10 e 11.....	83
<u>Figura 5.28</u> Chapas testadas no ensaio de dobramento ;Chapa 7.....	84
<u>Figura 5.29</u> Chapas testadas no ensaio de dobramento ;Chapa 8.....	85
<u>Figura 5.30</u> Chapas testadas no ensaio de dobramento ;Chapa 9.....	86
<u>Figura 5.31</u> Chapas testadas no ensaio de dobramento ;Chapa 10.....	87
<u>Figura 5.32</u> Chapas testadas no ensaio de dobramento ;Chapa 11.....	88
<u>Figura 5.33</u> Chapas testadas no ensaio de dobramento ;Chapa 8 revenida.....	89
<u>Figura 5.34</u> Falha para teste em campo de chapa revenida da segunda laminação.....	92
<u>Figura 5.35</u> Falha para teste em campo de chapa revenida da segunda laminação.....	92

Sumário

1	Introdução	8
2	Revisão Bibliográfica.....	13
2.1	Difusão.....	13
2.2	Mecanismos formadores de adesão por deformação	17
3	Objetivos	22
4	Procedimento Experimental	22
4.1	Preparação das amostras a serem laminadas.....	22
4.1.1	Montagem da amostra 1	23
4.1.2	Montagem das amostras 2, 3, 4, 5 e 6	25
4.1.3	Montagem das amostras 7, 8, 9, 10 e 11	26
4.2	Laminação.....	28
4.2.1	Laminação da Amostra 1	31
4.2.2	Laminação das Amostras 2, 3, 4, 5 e 6	33
4.2.3	Laminação das células 7, 8, 9, 10 e 11	34
4.3	Preparação de amostras para análises em microscopia	35
4.3.1	Preparação de amostras para a Chapa 1.....	36
4.3.2	Preparação de amostras para as chapas 2, 3, 4, 5 e 6	37
4.3.3	Preparação de amostras das chapas 7, 8, 9, 10 e 11	38
4.4	Microdureza.....	39
4.5	Ensaio mecânico de adesão	41
4.5.1	Ensaio de Dobramento	43
4.6	Teste em campo	48
4.7	Tratamento Térmico.....	49
5	Resultados e Discussões.....	49
5.1	Resultados no microscópio óptico e MEV	52
5.1.1	Chapa 1.....	52
5.1.2	Chapas 2, 3, 4, 5 e 6 (protótipos).....	59
5.1.3	Chapas 7, 8, 9, 10 e 11.....	67
5.2	Testes de Microdureza.....	69
5.2.1	Microdureza para a chapa 1	70
5.2.2	Microdureza para as chapas 2, 3, 4, 5 e 6	71
5.2.3	Microdureza para as chapas 7, 8, 9, 10 e 11	72
5.3	Análise por EDS em MEV	74
5.3.1	Análise por EDS das contaminações	74
5.3.2	Análise por EDS da difusão na interface.....	78
5.4	Ensaio de dobramento	81
5.5	Teste em Campo	89
6	Conclusões	92
7	Referências.....	95

1 Introdução

As chapas clad são materiais compósitos obtidos pela junção de uma placa de aço inoxidável superficial sobre um aço carbono ou aço baixa liga a ser protegido. Obtendo-se material de menor custo, quando comparadas a chapas feitas unicamente do material de superfície, as chapas clad são muito utilizadas na engenharia naval, revestimento de tanques industriais e aplicações onde a resistência estrutural é igualmente exigida frente à resistência a oxidação.

No presente trabalho, resume-se um projeto de desenvolvimento tecnológico criado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, onde a soldagem sólida se estende a aplicações em lâminas de corte para cana de açúcar. Nestas lâminas, utilizadas em máquinas de colheita, um aço ferramenta de alta dureza seria soldado em fase sólida a uma base de aço comum (aço carbono) por meio da co-laminação dos dois materiais, de maneira a reduzir o custo do produto final e obter-se lâmina com fio de alta dureza.

A mecanização das colheitas de cana de açúcar consiste em um processo em pleno crescimento no país. Apesar de reduzir um pouco o aproveitamento da cana, as máquinas trabalham em velocidade muito superior a colheita manual e também reduzem o impacto ambiental do cultivo. Isso porque, a máquina dispensa a queima dos resíduos, comumente praticada na colheita manual.

O corte manual da cana de açúcar é ainda o modo mais comum de colheita, porém, seja este alvo de muitas críticas pela necessidade de queima da cana pré-corte. Esta queima não somente prejudica o meio ambiente por emissões gasosas, como pode gerar acidentes, como um incêndio florestal, por exemplo.

Após a queima, o trabalhador que realiza a colheita da cana inicia o corte dos colmos a altura basal e a retirada dos ponteiros restantes. A cana cortada começa então a ser distribuída no terreno para a formação dos leitos. A capacidade de corte de um trabalhador que atua nessa atividade fica em torno de 5 toneladas por dia, sendo que esta estimativa pode variar consideravelmente com o porte da cana cortada. Isto é, plantas eretas costumam facilitar a atividade, enquanto as acamadas tornam o trabalho mais difícil.

O corte mecanizado trabalha de maneira similar, mas as partes da cana desnecessárias na produção do álcool são separadas, de maneira eficiente, pela máquina. Este tipo de colheita ainda precisa ser aprimorada no Brasil. Isto porque as máquinas nacionais ainda precisam ser aperfeiçoadas, por apresentar baixo rendimento e necessitar frequentemente de manutenção. Por outro lado, estima-se que as colheitadeiras atuais possam diminuir em até 30% os custos de produção de cana de açúcar, sendo cada máquina responsável por uma colheita de até 800 toneladas por dia.

A mecanização da colheita da cana é uma prática em expansão no país, visto a redução de custos, o aumento da produtividade e o interesse do governo em acabar com as denúncias aos meios de exploração do trabalho nos campos de colheita. Essas denúncias são obviamente fundamentadas nas condições de trabalho dos trabalhadores da colheita manual. Este é um aspecto da produção de cana de açúcar no Brasil que pode atrapalhar a formação de uma imagem positiva dos biocombustíveis no mundo. Desta maneira, o governo brasileiro se comprometeu a acabar com a colheita manual da cana até o ano de 2017.

A colheita mecanizada já esta sendo amplamente utilizada no Estado de São Paulo. Em 2008, mais de 50% da área total de plantio de cana foi colhida com utilização das máquinas colheitadeiras. Sendo que estes números devem aumentar daqui para frente em todas as regiões do país.

As máquinas utilizadas atualmente fazem uso de lâminas de base de baixo corte e durabilidade. A configuração destas lâminas está evidenciada na Figura 1, sendo que a espessura das lâminas atuais é muito superior à mostrada na Figura (aproximadamente 5 mm). Neste projeto, objetiva-se produzir lâminas bimetálicas de espessura inferior (Figura 1) e de maior rendimento e durabilidade.

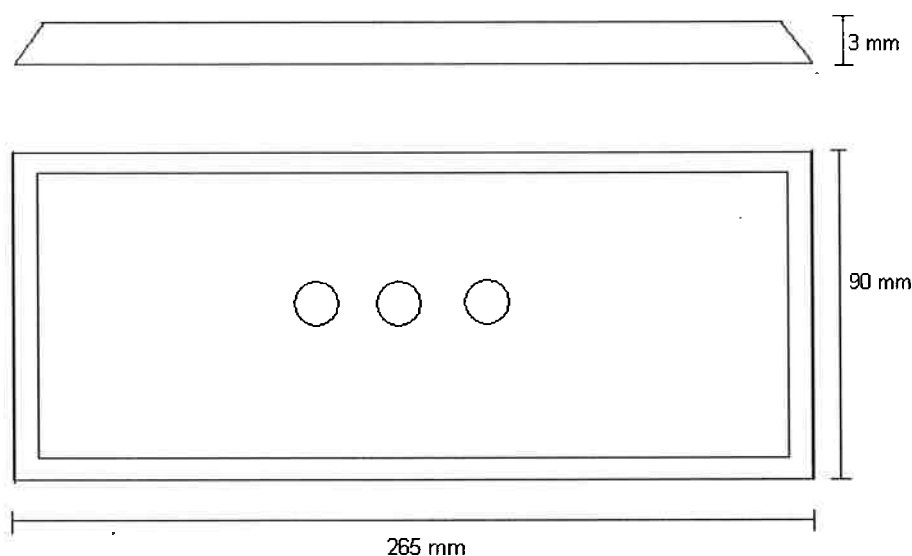


Figura 1.1 Lâmina de corte basal para colheitadeiras de cana de açúcar com espessura desejada.

As máquinas de corte de cana possuem diversas lâminas que trabalham o corte superior e inferior da cana de açúcar. O corte superior tem propósito de se desfazer da vegetação esverdeada acima do caule, por esta não possuir valor

para a indústria produtora de etanol. Este corte não exige lâminas muito sofisticadas, visto que as lâminas não estão expostas a grandes esforços e desgastes. Já o corte inferior, é responsável por retirar o colmo da cana do solo e assim permitir seu recolhimento. Neste caso, as lâminas estão expostas a um desgaste muito maior, pela resistência ao corte do colmo ser naturalmente muito superior a das folhas superiores. Estas lâminas ainda estão sujeitas a sofrer choques contra pedras ou qualquer outro material que esteja depositado no terreno da plantação. Desta maneira, a necessidade de aperfeiçoamento das lâminas de corte inferior (esquemáticas na Figura 1) tornou-se o objetivo deste trabalho.

A base de corte das colheitadeiras consiste de um disco permanente e giratório que é responsável pela fixação das lâminas substituíveis ao longo de seu perímetro. Cada máquina possui dois discos com, em média, 5 lâminas cada um. Esta configuração pode ser observada na Figura 2 para o item "A".

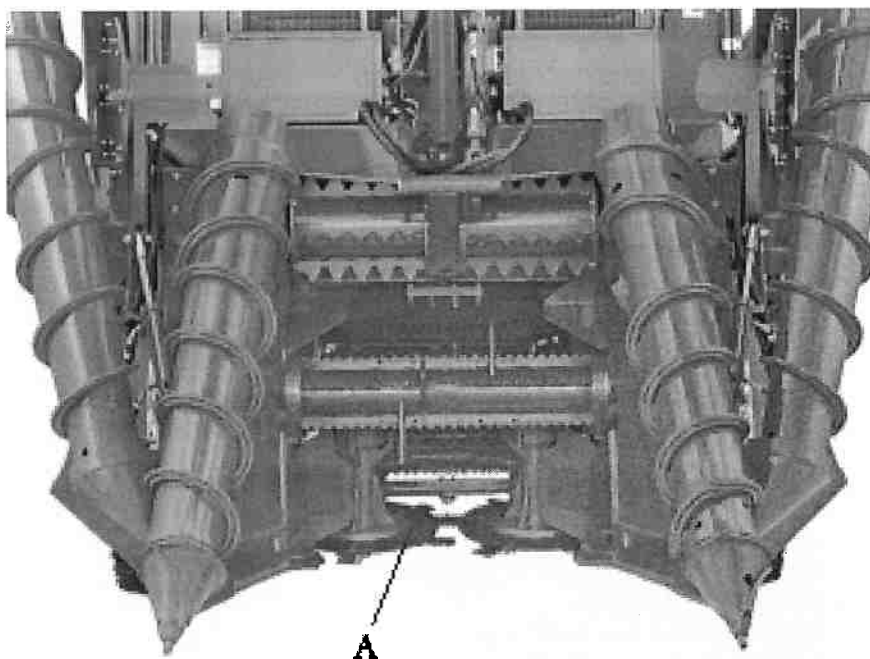


Figura 1.2 Foto de uma colheitadeira de cana de açúcar. Detalhe para o disco giratório(A).

Neste trabalho, a soldagem sólida de dois materiais co-laminados tem abordagem um pouco diferente das chapas clad. As chapas clad geralmente trabalham com a soldagem superficial de aço inox, enquanto as chapas deste projeto devem possuir superfície em aço com bom desempenho de corte. O objetivo seria aproveitar esta superfície para terminar o fio da lâmina em seu campo de alcance, economizando assim os custos necessários para se fabricar uma lâmina inteiramente em aço ferramenta. Desta maneira, a microestrutura do produto final, as propriedades mecânicas desejáveis e uma série de aspectos físicos envolvidos na produção destes materiais bimetálicos serão um pouco diferentes dos aspectos discutidos para a produção de chapas clad.

Para que a discussão dos resultados experimentais deste projeto seja apropriada ao leitor, segue no próximo tópico uma revisão teórica que objetiva explicar os fundamentos da soldagem no estado sólido e quais são as variáveis que poderiam influenciar diretamente a qualidade do produto final.

2 Revisão Bibliográfica

A soldagem no estado sólido abordada neste trabalho deriva de deformação plástica macroscópica, obtida por meio da co-laminação dos dois materiais simultaneamente.

Nesta revisão, objetiva-se explicar quais seriam os mecanismos associados à soldagem e a boa adesão entre as duas chapas a serem co-laminadas. Portanto, um bom meio de iniciar o tema seria definir a difusão e posteriormente apresentar qual o tipo de interação entre os átomos expostos na interface. A literatura existente sobre a soldagem em estado sólido divide os mecanismos para difusão com ou sem deformação macroscópica do material, como no caso deste projeto. Desta maneira, os mecanismos de difusão não serão os únicos e principais meios para a adesão.

2.1 Difusão

Na literatura, diferentes efeitos são citados como causadores da adesão, e existe alguma divergência entre os estudos consagrados no meio. A relação da difusão com o processo de adesão para casos de soldagem em estado sólido, diferentes da soldagem por difusão, ainda não foi estudada

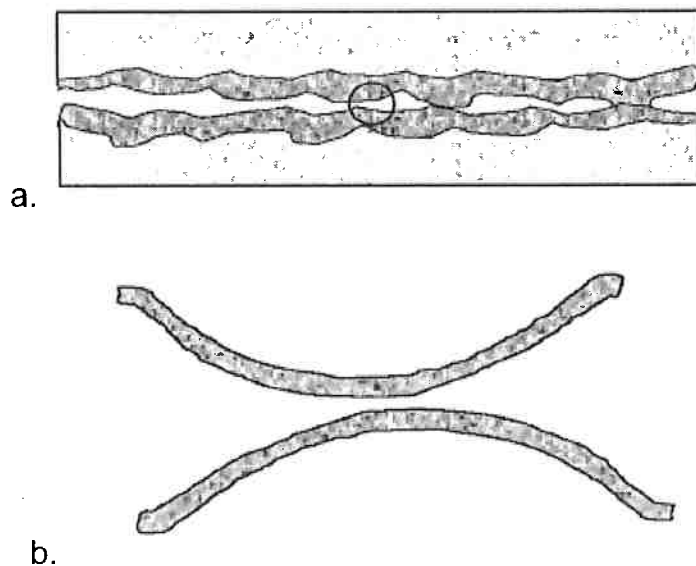
experimentalmente de maneira apropriada. A importância da difusão no processo de soldagem por co-laminação de dois materiais, permanece, portanto, sujeita a especulação. Mesmo assim, é evidente que a difusão na interface terá papel importante, modificando a forma e tamanho de espaços vazios existentes nesta região. [9]

Um processo de soldagem em estado sólido denominado soldagem por difusão demonstra que a difusão pode promover a soldagem sem deformações macroscópicas. Este método consiste em uma das formas mais antigas de se unir dois metais, sendo que algumas jóias antigas eram fabricadas desta maneira. A sua utilização industrial é recente, e o desenvolvimento desta técnica tem sido especialmente favorecido por aplicações na indústria aeronáutica. [13]

A soldagem por difusão é realizada em uma atmosfera inerte, com temperaturas superiores a 50% da temperatura de fusão do material e com uma pressão aplicada entre $0.7-10 \text{ Nmm}^{-2}$ [4]. Vale lembrar que esta pressão não possui intensidade suficiente para realizar deformação plástica macroscópica sobre o material. Para estes casos, a interdifusão de átomos pela interface bimetálica consiste do principal mecanismo formador da solda. Os óxidos formados na interface metálica devem atrapalhar a difusão, e tornam a soldagem por difusão quase impraticável para metais que possuem camadas de óxido muito estáveis. [4]

O mecanismo formador do caldeamento para a soldagem por difusão é parecido com o discutido neste projeto. O processo ocorre em dois estágios evidenciados na Figura 3. Inicialmente, as duas superfícies formadas por camadas de óxidos se encontram sem que ocorra qualquer modificação (Figura

2.1a). As asperezas naturais dessas superfícies acabam concentrando tensões que levam a ruptura parcial de algumas regiões da camada oxidada (Figura 2.1b). Este efeito é obviamente proporcionado pela aplicação de pressão entre as chapas. Neste momento, algumas regiões virgens proporcionam o contato direto entre os dois metais, e permitem a formação de ligações e o início da difusão (Figura 2.1c), o que caracteriza o segundo estágio. Neste momento, a temperatura aplicada impulsiona a difusão e permite a diminuição dos vazios de contração, e também permite dissolver e esferoidizar algumas camadas de óxido reduzidas durante a deformação plástica microscópica (Figura 3c). A difusão permite aumentar a área de contato para a formação das ligações metálicas. Para o caso da soldagem por co-laminação, a importância da difusão acaba sendo mascarada pelos outros mecanismos envolvidos. [4]



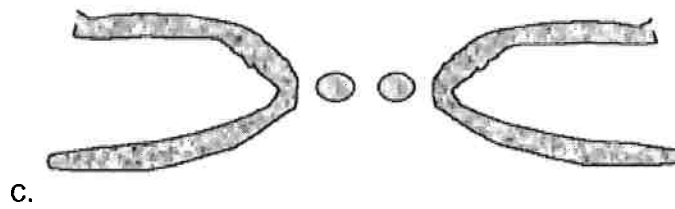


Figura 2.1 Figura 2.1 Desenho esquemático para soldagem por difusão. primeira etapa (a) e (b); segunda etapa (c). [4]

A laminação a quente consiste no meio admitido neste projeto como apropriado para se produzir o material bimetalico de dimensão reduzida. As altas temperaturas das células a serem laminadas favorecem a difusão e diminuem a resistência da camada de óxidos encontrada na interface entre os dois materiais. Em muitos casos, torna-se interessante laminar o material a frio e depois levar o produto ao forno para promover a difusão.

Para este estudo, fica evidente uma variação na tendência a difusão do carbono como comumente evidenciada nos estudos realizados com chapas clad com aço inoxidável. Isto porque a atividade do carbono não varia significativamente entre ligas de aço ferramenta e de aço carbono, utilizadas para a produção das lâminas bimetalicas. As variações de composição química entre as ligas se limitam a elementos como o cromo e o molibdênio, presentes em quantidade expressiva apenas no aço ferramenta.

Para alguns materiais, a difusão na interface bimetalica pode colaborar com a remoção de contaminantes na área de solda, especialmente para metais reativos como o titânio [13].

Os efeitos da difusão sobre as propriedades finais do produto não estão apenas relacionados com a qualidade do caldeamento entre os componentes do

sistema. Na realidade, a difusão na interface pode proporcionar endurecimento por solução sólida e deslocamento da interface por efeito kirkendall.

O processo de difusão não consiste do principal mecanismo formador da adesão para os casos onde ocorre deformação macroscópica. Na verdade, os principais motivos para a formação da solda estão relacionados à deformação causada pela co-laminação das peças e os cuidados realizados durante a produção das lâminas. Os principais mecanismos formadores de adesão estão descritos em seqüência a este tópico.

2.2 Mecanismos formadores de adesão por deformação

As forças de atração atuantes na interface formada são as mesmas que operam em uma ligação metálica simples, chamadas de forças de coesão. Para que esta ligação ocorra, um íntimo contato físico entre os átomos das duas chapas é necessário. [5]

Para que dois átomos dos metais em questão possam se atrair, uma distância necessária deve ser atingida. A força de atração entre estes dois átomos pode ser observada na Figura 2.2. Admitindo os valores negativos como a forças de atração e os positivos de repulsão, fica claro que algum nível de aproximação é necessário para que as forças de atração atinjam valores significativos, sendo que um máximo pode ser obtido para a aproximação r_0 . [5]

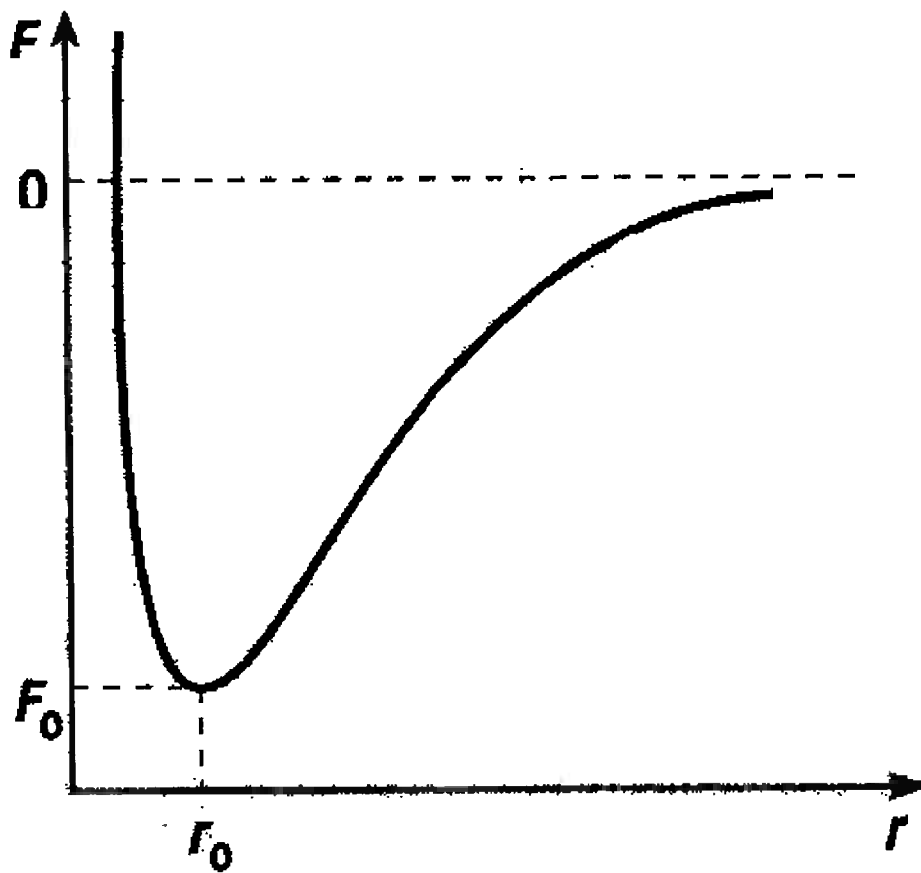


Figura 2.2 Força envolvida na aproximação de dois átomos.

Um desafio à aproximação a nível atômico das duas chapas consiste na camada de óxidos e impurezas contidas na superfície de todo metal. Uma superfície normalmente apresenta uma camada de óxidos junto ao metal, e acima desta camada sempre há um outro filme de gases ou líquidos adsorvidos. Desta maneira, mesmo quando submetido a uma limpeza superficial, um metal, para estes efeitos, nunca deve ser considerado absolutamente livre de contaminações (Figura 2.3). [5]

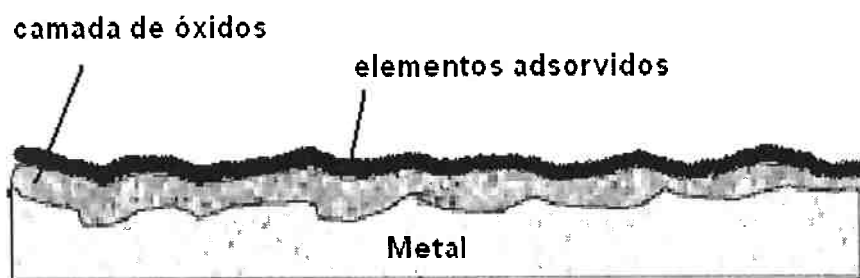


Figura 2.3 Esquema de camadas superficiais em um material metálico

Verifica-se, agora, que o contato físico entre as superfícies a serem soldadas em estado sólido fica prejudicado pela presença destes contaminantes. Mesmo que a superfície seja lixada ou atacada quimicamente, a camada de óxidos de equilíbrio se forma muito rapidamente. Portanto, se a ruptura desses óxidos for realizada em uma região livre do contato com o ar, os materiais metálicos poderiam finalmente aproximar seus átomos e formar ligações metálicas. Por meio da laminação, fica então possível a união das superfícies por uma deformação macroscópica que leva ao aumento da área de contato entre os dois materiais. Esta área, agora aumentada, apresenta fissuras das camadas de impurezas contidas nos dois materiais. Estas “janelas” livres de contaminação por muitas vezes se combinam umas entre as outras e geram a adesão desejada em área definida. Estes pontos ideais serão então responsáveis pela soldagem no estado sólido (Figura 2.4). [5]

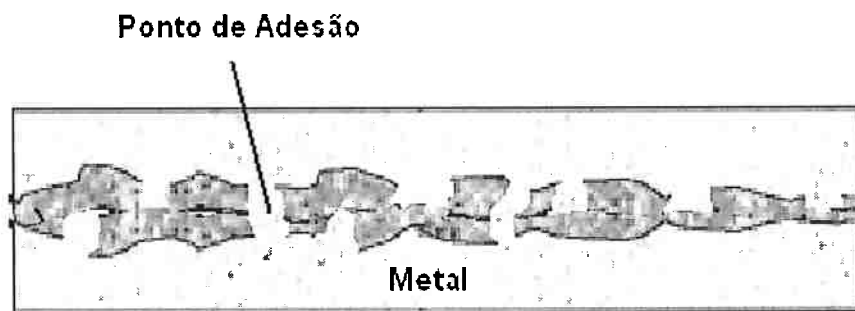


Figura 2.4 Pontos de adesão em duas chapas co-laminadas

Uma continuidade para este processo seria o processo de difusão, discutido anteriormente. Na realidade, não existe soldagem em estado sólido sem deformação. A camada de óxidos existente na interface sempre será uma barreira para as forças de coesão e para a difusão. Desta maneira, pode-se estabelecer uma relação entre a soldabilidade em fase sólida de um metal com a resistência a fratura de sua respectiva camada de óxidos. Isto explica a variância entre os níveis de deformação necessários para que ocorra adesão para diferentes metais.

Como dito, os mínimos níveis de deformação para que ocorra adesão, com alguma resistência, entre os dois componentes devem possuir relação direta com os limites de resistência à fratura dos óxidos superficiais. Por outro lado, os resultados medidos indicam que os níveis de deformação para que ocorra adesão são muito maiores do que os necessários para que ocorra a fratura da camada de óxidos. Na década de 60, Tylecote [14] afirmou que: 1) o efeito dos contaminantes superficiais e; 2) o efeito do relaxamento das tensões elásticas que romperiam as soldas formadas quando a tensão aplicada é retirada; são as causas responsáveis por este comportamento.

O primeiro efeito está relacionado às contaminações que surgem na interface de materiais clad. Durante a limpeza dos materiais, os gases e líquidos adsorvidos não são totalmente eliminados e durante a formação de áreas de adesão, estas contaminações migram para estas janelas evitando o caldeamento. [5]

Algumas fases intermetálicas que se alojam nas interfaces do sistema são comuns para chapas clad produzidas por co-laminação. Chen e Yang [4] observaram algumas contaminações para o caldeamento de chapas de aço inoxidável com ligas a base de níquel. Estas contaminações derivam de escórias formadas durante a pré-soldagem dos pacotes a serem laminados e de sobras de gases e materiais contaminantes mesmo após a limpeza das superfícies. Gonçalves [5] também constatou que algumas contaminações existentes na interface poderiam ser provenientes desta etapa de pré-soldagem.

O segundo efeito deriva da variação nas tensões aplicadas sobre o produto. Quando as tensões da laminação são retiradas, um relaxamento elástico deve ser esperado para o material deformado. Este relaxamento deve romper algumas das ligações metálicas formadas durante a solicitação e diminuir o íntimo contato entre os componentes. Avaliar o grau de influência deste fenômeno sobre o caldeamento é improvável, mas a visualização desse efeito (recuperação elástica) sobre materiais pressionados é rotineira. Desta maneira, a influência desses mecanismos sobre o caldeamento ainda corresponde a uma área passível de especulações.

3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar a produção de lâminas bimetálicas pela co-laminação de um aço ferramenta sobre um aço base a ser estudado. Estas lâminas teriam um alto desempenho de corte aplicado ao aço ferramenta superficial, enquanto o aço base teria papel estrutural.

A qualidade de adesão entre os dois materiais será analisada por micrografias e ensaios mecânicos. Objetiva-se variar alguns parâmetros de laminação em busca do melhor desempenho das chapas, e assim fixar um grau de redução ótima e temperatura de laminação apropriados.

Os materiais utilizados serão estudados metalograficamente, suas durezas serão trabalhadas para atingirem níveis de interesse e para isso as chapas serão tratadas termicamente, quando necessário.

Através deste estudo, objetiva-se expandir a técnica de fabricação de chapas clad para o desenvolvimento de ferramentas de corte e para a produção de lâminas de corte basal para colheitadeiras de cana de açúcar de alto desempenho.

4 Procedimento Experimental

4.1 Preparação das amostras a serem laminadas

Como dito anteriormente, os materiais utilizados na preparação das amostras são um aço ferramenta e um aço base a ser determinado. As amostras foram preparadas em pacotes de duas tiras de aço ferramenta dispostas sobre

uma chapa base. A configuração das amostras e as ligas utilizadas seguem descritas para cada amostra individualmente.

4.1.1 Montagem da amostra 1

Durante uma visita a empresa Brasmetal, uma amostra para testes de laminação foi preparada com a ajuda de técnicos em solda. O objetivo seria testar a adesão entre o aço ferramenta e uma liga de aço carbono e observar a qualidade da interface formada pela co-laminação desses componentes. O aço ferramenta escolhido entre os disponíveis em estoque na empresa foi o D6a, com composição indicada na Tabela 1. Para aço base, foi utilizado um aço carbono SAE 1045 de composição especificada na Tabela 2. A escolha do aço D6A deriva da disponibilidade do mesmo na empresa e de suas importantes propriedades como aço ferramenta (alta dureza e boa temperabilidade). Este aço acabou sendo utilizado em todas as amostras ensaiadas. O aço 1045 foi escolhido por ser um aço carbono comum e de baixo custo.

Tabela 1 - Composição do aço D6a

ELEMENTO	C	Cr	Ni	MO	V
Wt%	0.43-0.49	1.05	0.55	1.0	0.12

Tabela 2 - Composição do aço SAE1045

ELEMENTO	C	Mn	P	S
Wt%	0.43-0.50	0.60-0.90	0.040	0.050

O aço base sofreu dois chanfros de largura equivalente à do aço ferramenta, para que o D6a seja soldado sobre o aço carbono nesta região. Um esquema da montagem da amostra pode ser observado na Figura 4.1.

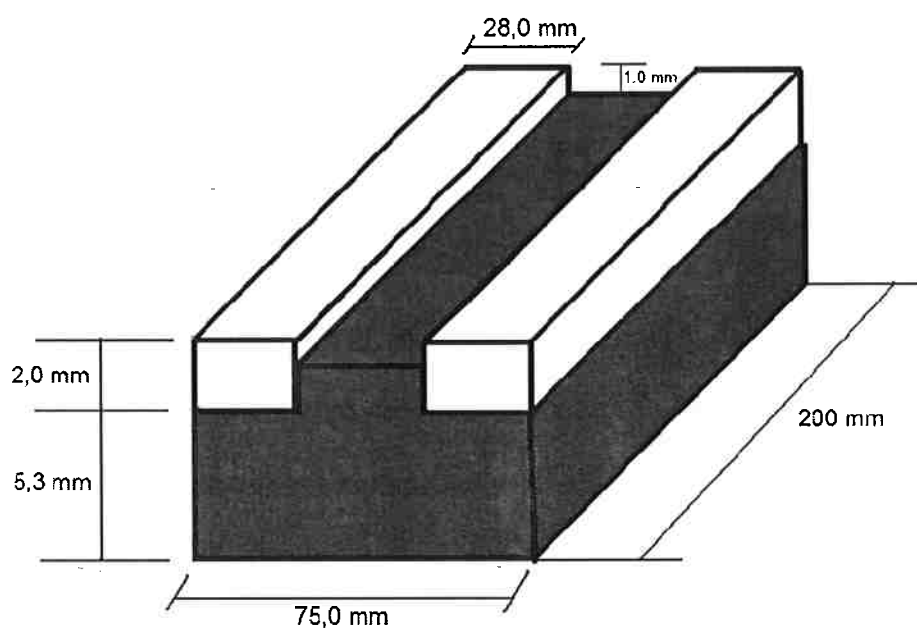


Figura 4.1- Esquema de montagem da amostra 1. O aço ferramenta está representado em branco.

As chapas foram desengraxadas com soda cáustica e a superfície de contato foi cuidadosamente escovada na direção de laminação com escova de aço para que a camada de óxidos superficiais fosse evitada ao máximo, gerando assim boa adesão e ativando a superfície. Depois de desengraxadas, as chapas são finalmente soldadas por eletrodo revestido, de maneira a evitar o contato com ar da área a ser soldada e não permitir o deslocamento das tiras em relação

à chapa base durante a conformação mecânica. Estas amostras foram trazidas ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas para que a laminação pudesse ser efetuada.

4.1.2 Montagem das amostras 2, 3, 4, 5 e 6

Em visita a Brasmetal no dia 09/04/09, cinco células foram montadas com o mesmo aço ferramenta (D6a) e um novo aço base chamado 50CrMo4 de composição mostrada na Tabela 3. Desta vez, objetiva-se produzir protótipos de dimensão semelhante às lâminas utilizadas em máquinas para corte de cana de açúcar.

Tabela 3 - Composição química da liga 50CrMo4

ELEMENTO	C	Si	Mn	Cr	P
Wt%	0.43-0.50	0.25	0.7	1.10	0.2

A largura da célula passa a ser a mesma das lâminas do mercado (Figura 4.2), e o chanfro antes aplicado no aço base é descartado para simplificar a produção e futuramente baratear a fabricação destas lâminas. Neste dia, além do desengraxante, foi utilizado decapante com 8% em HCL para a limpeza superficial das chapas. As soldas foram novamente feitas com eletrodo revestido e ligante de aço inox 316L. Um esquema das amostras 2, 3, 4, 5 e 6 está mostrado na Figura 4.2.

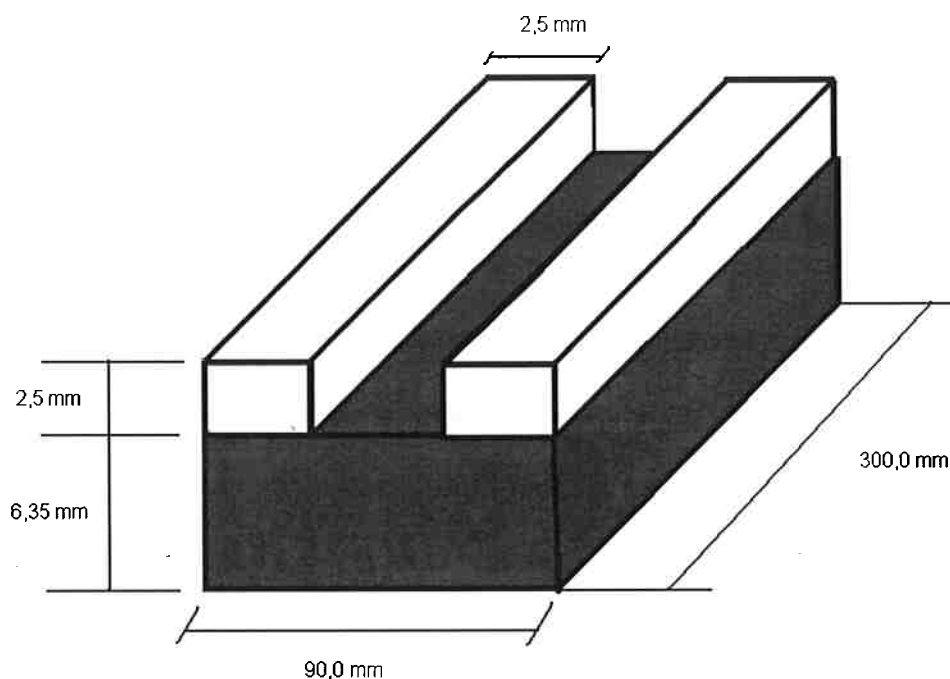


Figura 4.2- Esquema de montagem das amostras para chapas 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

Estas amostras foram trazidas ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas para que a laminação pudesse ser efetuada. O produto desta laminação foi posteriormente encaminhado para um teste prático em campo, como descrito no tópico "Teste em campo".

4.1.3 Montagem das amostras 7, 8, 9, 10 e 11

As amostras 7, 8, 9, 10 e 11 possuem largura e espessura de D6A diferenciadas das células utilizadas na produção de protótipos, e o aço base volta a ser o 1045. Isso porque, a largura da peça não deve influenciar as características finais do produto laminado, e as tiras de D6a de 2,5 mm não estavam mais disponíveis. As dimensões das amostras estão expostas na

Figura 4.3. Os procedimentos de preparo são indistintos dos usados nas amostras 2, 3, 4, 5 e 6 (protótipos da segunda laminação).

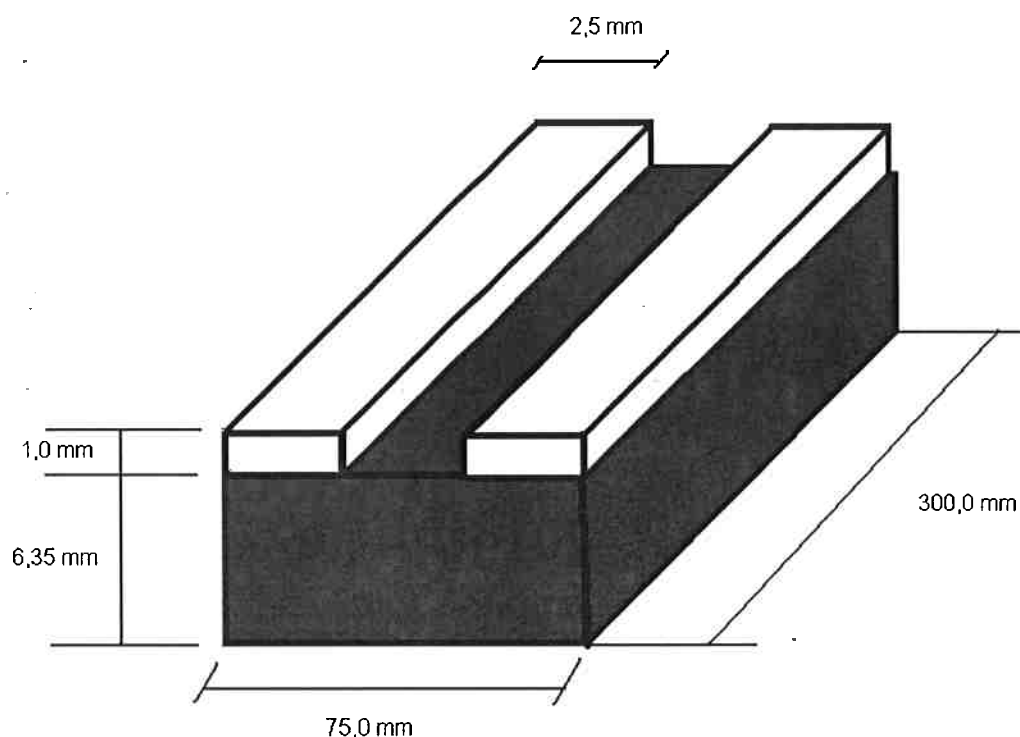


Figura 4.3 - Esquema de montagem das amostras para chapas 7, 8, 9, 10 e 11.

Devido à diferença de espessura do aço ferramenta destas células, a condição de redução será expressa em função da redução aplicada no aço ferramenta, e os resultados não serão comparados com os anteriores. Ou seja, os resultados da terceira laminação buscam um equilíbrio nas condições de laminação por um critério de comparação entre os produtos gerados apenas na terceira laminação. Assim como descrito anteriormente, a primeira laminação foi realizada como teste para a amostra 1, a segunda laminação foi realizada para a produção de protótipos de lâminas a serem testados em campo (amostras 2, 3,

4, 5 e 6) e a terceira laminação foi realizada com as amostras 7, 8, 9, 10 e 11 em busca de um equilíbrio nos parâmetros de laminação.

Esta etapa do trabalho define algumas variáveis de processo, e objetiva encontrar uma condição ótima de temperatura e redução entre as amostras ensaiadas. O critério de comparação entre as qualidades de adesão para os produtos da terceira laminação será um ensaio de dobramento realizado de acordo com norma ASTM para chapas clad. Este ensaio está descrito no item "ensaio mecânico de adesão".

4.2 Laminação

A laminação das peças foi realizada em um laminador reversível de 50t com uma velocidade rotação em marcha lenta do cilindro de 30 rpm disponível no Instituto de Pesquisas Tecnológicas e mostrado nas Figuras 4.5 e 4.6. As peças foram laminadas a quente e o número de passes variou entre as amostras devido a variações no grau de redução total e algumas particularidades durante o processo. As amostras eram aquecidas até a temperatura de laminação em um forno elétrico (Figura 4.4), sem atmosfera controlada, durante meia hora. Em seguida, eram realizados dois ou três passes no laminador para que a amostra pudesse retornar ao forno (quando necessário). O processo foi realizado de maneira organizada e rápida, evitando grandes perdas de temperatura da peça para a mesa e cilindro do laminador. Enquanto uma pessoa controlava o sentido de laminação, outras duas se dispunham em cada lado da mesa de laminação para manusear a amostra.

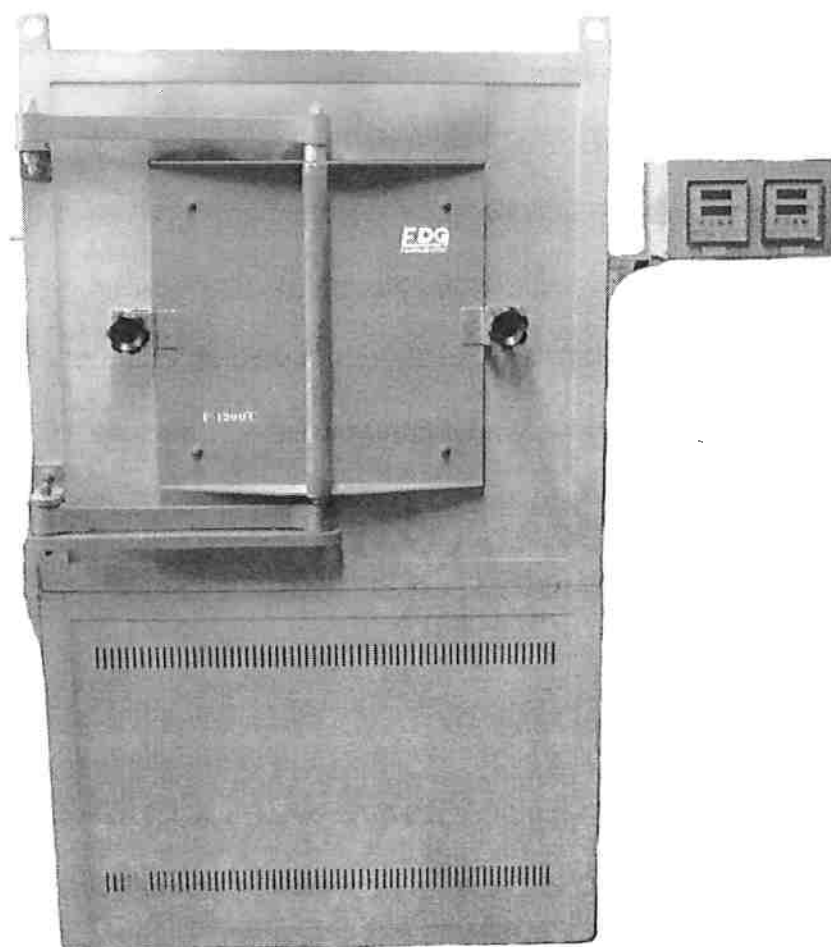


Figura 4.4 - Forno EDG Utilizado durante a laminação

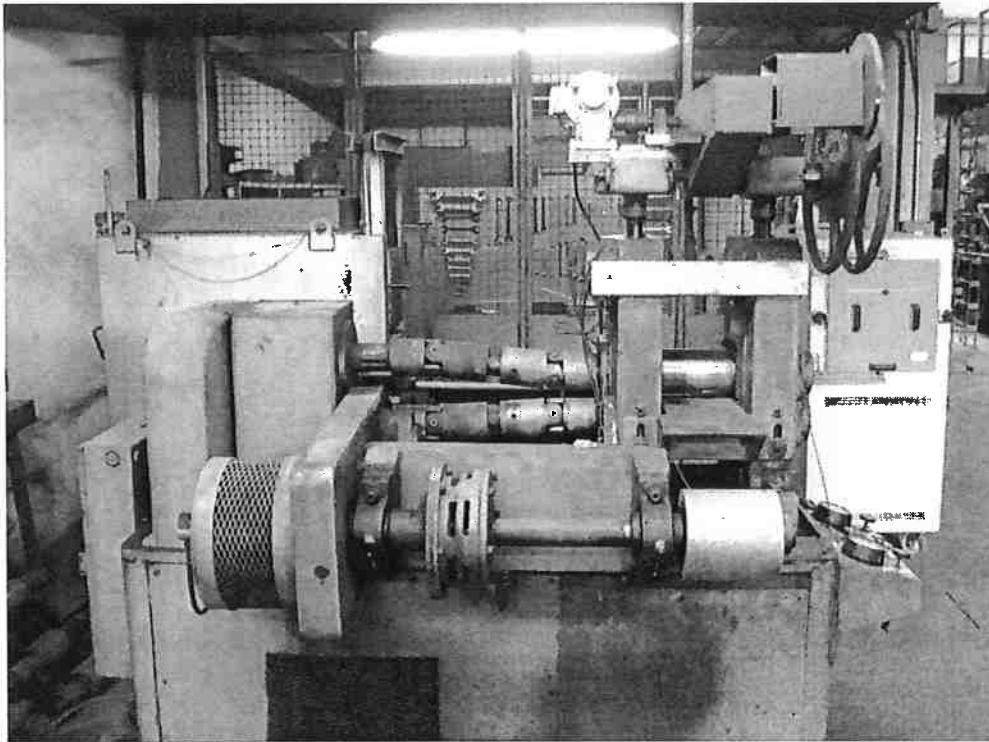


Figura 4.5 - Laminador reversível

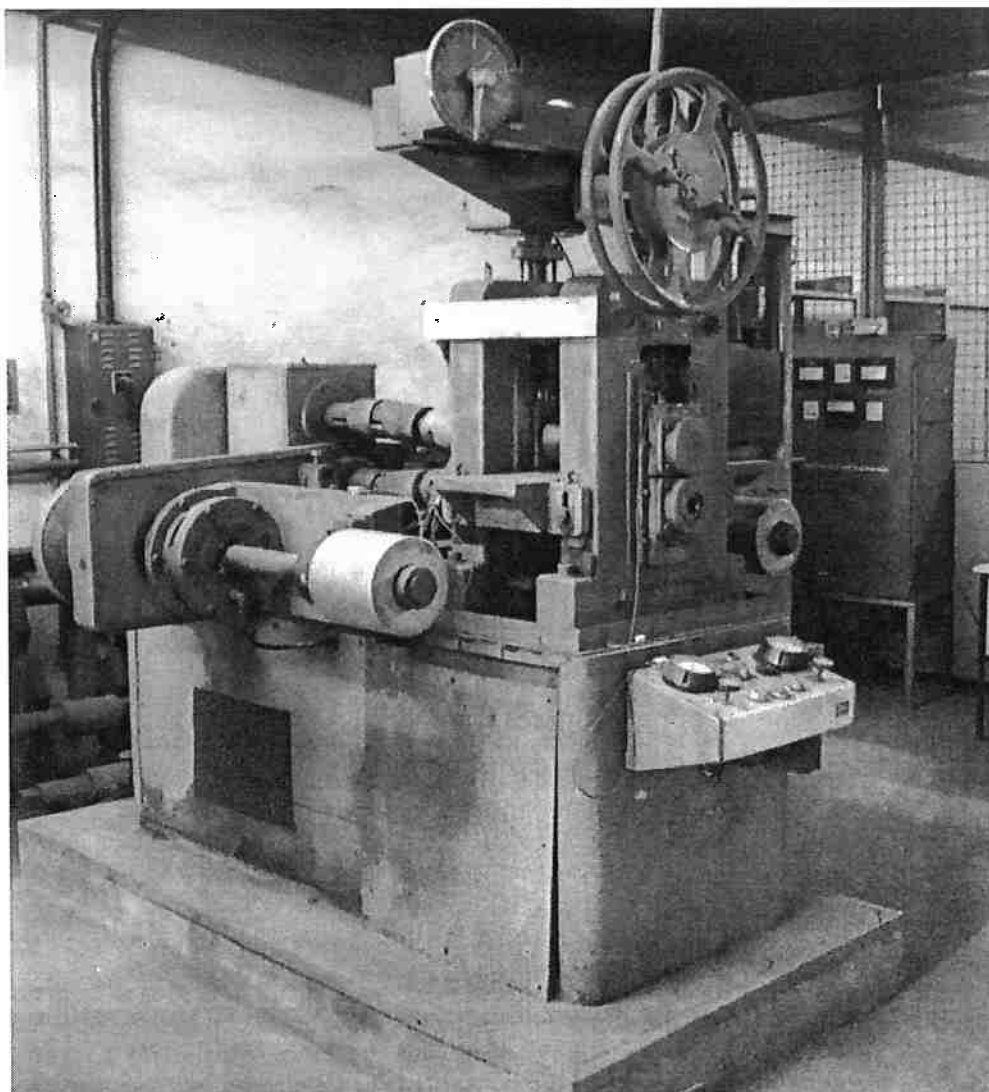


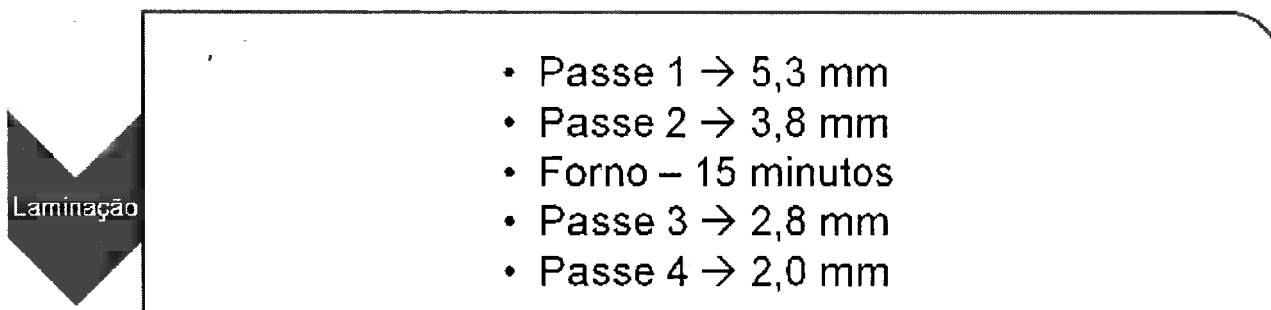
Figura 4.6 - Laminador reversível

4.2.1 Laminação da Amostra 1

No dia 19/12/08, a primeira amostra foi levada ao forno com temperatura de 1100°C por meia hora. De acordo com Gonçalves [5], a temperatura de laminação possui grande influência sobre a qualidade de adesão para a produção de chapas clad, o que pode ser considerada uma boa aproximação para a produção das lâminas deste projeto. Como dito anteriormente, as altas temperaturas podem influenciar a resistência a fratura dos óxidos que dificultam

a aproximação dos átomos das duas ligas, além de favorecer a difusão. Desta maneira, optou-se por uma temperatura próxima ao limite técnico do forno utilizado. O mesmo conceito foi aplicado ao grau de redução, que pela literatura [14] deveria ser maior que 60% de redução total. Como dito anteriormente, a primeira laminação foi efetuada para analisar a adesão entre o aço ferramenta e o aço carbono e observar a qualidade da interface entre os dois componentes.

Depois do aquecimento no forno, a amostra sofre sua primeira redução, por meio de dois passes de aproximadamente 1mm e 0,5mm de redução na espessura, ajustados no laminador. Ao fim desta etapa, a amostra retorna ao forno por mais 15 minutos para depois passar pelo laminador por mais duas vezes com a mesma redução aplicada. O esquema teórico da laminação pode ser observado abaixo.



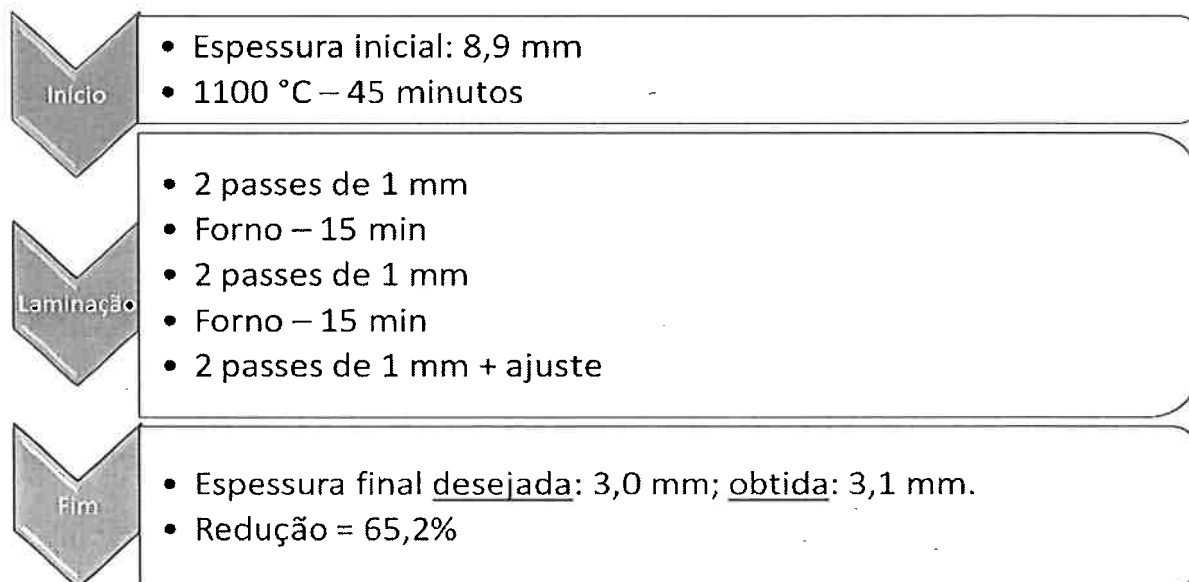
O produto final obtido possuía espessura superior à redução teórica aplicada no laminador (2,9mm quando o esperado era 2,0mm). Este efeito denomina-se cedagem, e está relacionado com a deformação elástica do conjunto (cilindros e cadeira). Os resultados da primeira laminação estão discutidos a frente, no tópico resultados e discussão para a Chapa 1.

4.2.2 Laminação das Amostras 2, 3, 4, 5 e 6

A qualidade da chapa produzida pela primeira laminação foi verificada por micrografias da interface bimetálica, que mostraram uma interface limpa e livre de contaminações. Estes resultados estão evidenciados no tópico 5.1.1. Foi decidido que o próximo passo seria montar amostras com dimensões apropriadas para a produção de 10 protótipos de lâminas similares as da Figura 4.2, sendo que cada amostra seria responsável pela produção de duas lâminas. Como visto na etapa de montagem destas amostras, a largura e comprimento dos pacotes respeitam as dimensões do produto final (Figura 1.1). O objetivo seria testar o desempenho do aço ferramenta e a qualidade da adesão entre os componentes. O produto da laminação seria diretamente testado nas máquinas para corte de cana. Desta maneira, determinou-se que 5 amostras seriam preparadas para a produção de 10 protótipos.

No dia 24/04/09, o tamanho final do produto laminado foi calculado por meio das dimensões das cinco novas células montadas e descritas anteriormente. Foi comprovado que o forno utilizado possuía espaço interno suficiente para receber as células responsáveis por dois protótipos cada, que ao final da laminação apresentariam cerca de 78,8 cm de comprimento (o suficiente para produzir os dois protótipos de aproximadamente 30 cm). As células foram laminadas com cerca de 6 passes cada, sendo que entre o terceiro e quarto passe, a célula retornava ao forno. Um esquema dessa laminação segue mostrado adiante. A espessura das lâminas utilizadas nas máquinas de corte de cana é de 3mm. As espessuras obtidas para os produtos de laminação variaram

entre 3,02 e 3,12mm. Os resultados da segunda laminação estão discutidos a frente, no tópico resultados e discussão para as células 2, 3, 4, 5 e 6.



4.2.3 Laminação das células 7, 8, 9, 10 e 11

A terceira laminação foi dividida em diferentes condições. As variações propostas para a temperatura de laminação assim como na redução das amostras estão mostradas na Tabela 4 (objetivo da laminação). O objetivo é constatar se a temperatura mais baixa (baixa difusão) e os menores níveis de deformação podem influenciar de maneira significativa na qualidade da adesão. A temperatura da amostra a ser laminada não foi medida durante os passes. Isso porque o procedimento foi realizado por partes, devolvendo a amostra para o forno depois de cada redução de espessura e aguardando tempo suficiente (15 minutos) para que a temperatura de ensaio fosse alcançada novamente. Este tempo foi confirmado para uma amostra com termopar acoplado.

Tabela 4 - Condições propostas para a laminação das amostras 7, 8, 9, 10 e 11

Célula	7	8	9	10	11
Temperatura(°C)	900°C	1000°C	1100°C	1100°C	1100°C
Espessura final	3,0mm	3,0mm	5,1mm	3,0mm	1,5mm
Redução total	60%	60%	30%	60%	80%

As variações de temperatura estão representadas pelas células 7 e 8, enquanto diferentes reduções serão aplicadas nas células 9 e 11. Desta maneira, foi realizado ensaio com cinco células para três temperaturas e três reduções. O esquema de cada laminação seguiu os passos descritos anteriormente, com o processo sendo interrompido quando a redução desejada era obtida. Os resultados foram obtidos por análise em microscópio óptico e ensaios de adesão. Estes resultados estão disponíveis no tópico resultados e discussão para chapas 7, 8, 9, 10 e 11.

4.3 Preparação de amostras para análises em microscopia

Nesta etapa do processo experimental, os produtos da laminação serão cortados e embutidos para análise em microscopia óptica e de varredura. As amostras geradas serão designadas de acordo com o produto de laminação correspondente. Para simplificar a leitura, os produtos laminados serão

chamados de chapas, e serão numerados de acordo com a amostra de que foram obtidos.

4.3.1 Preparação de amostras para a Chapa 1

A partir da peça laminada, oito amostras foram obtidas para serem analisadas em microscópio óptico e posteriormente por microscopia eletrônica de varredura. O produto laminado foi cortado em três "fatias" como na Figura 4.7.

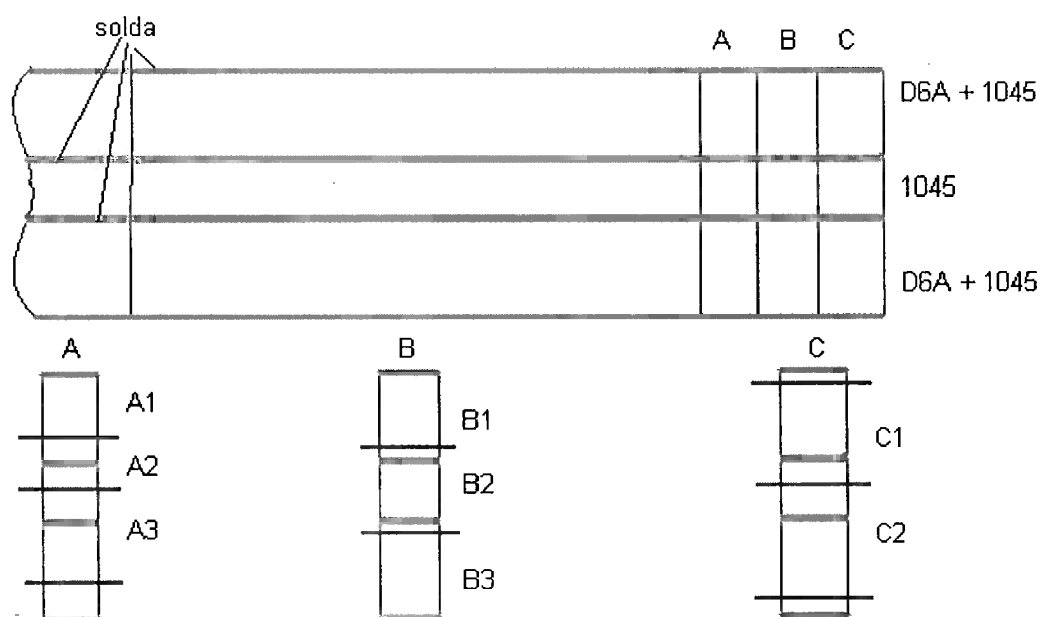


Figura 4.7 - Esquema da preparação de amostras para a chapa 1

Na Figura 4.7, podemos observar a vista superior da chapa 1, assim como as linhas de solda e os cortes A, B e C. Para que as partes pudessem ser

embutidas em baquelite, essas fatias foram cortadas nas regiões mostradas na Figura 4.7, produzindo amostras A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1 e C2.

As amostras foram embutidas de maneira que a seção dos três primeiros cortes (A, B e C) ficasse visível para análise. Desta maneira, fica possível observar a qualidade da interface entre o aço ferramenta e a base.

As amostras foram lixadas e polidas com pasta de diamante de 6 μ m, 3 μ m e 1 μ m. As imagens geradas para estas amostras estão discutidas no tópico resultados e discussão para a chapa 1.

4.3.2 Preparação de amostras para as chapas 2, 3, 4, 5 e 6

As chapas foram cortadas e embutidas de maneira similar à primeira. Desta vez, apenas um corte foi realizado para cada produto, e a sessão central (monometálica) foi desprezada, para que os dois lados bimetálicos da chapa fossem arranjados em apenas uma baquelite. Assim, foram embutidas, lixadas e polidas cinco amostras de nome p2, p3, p4, p5 e p6. Esta sigla representa abreviação de maneira que p2 significa protótipo da chapa 2. Na Figura 4.8, segue o esquema das amostras provenientes da segunda laminação.

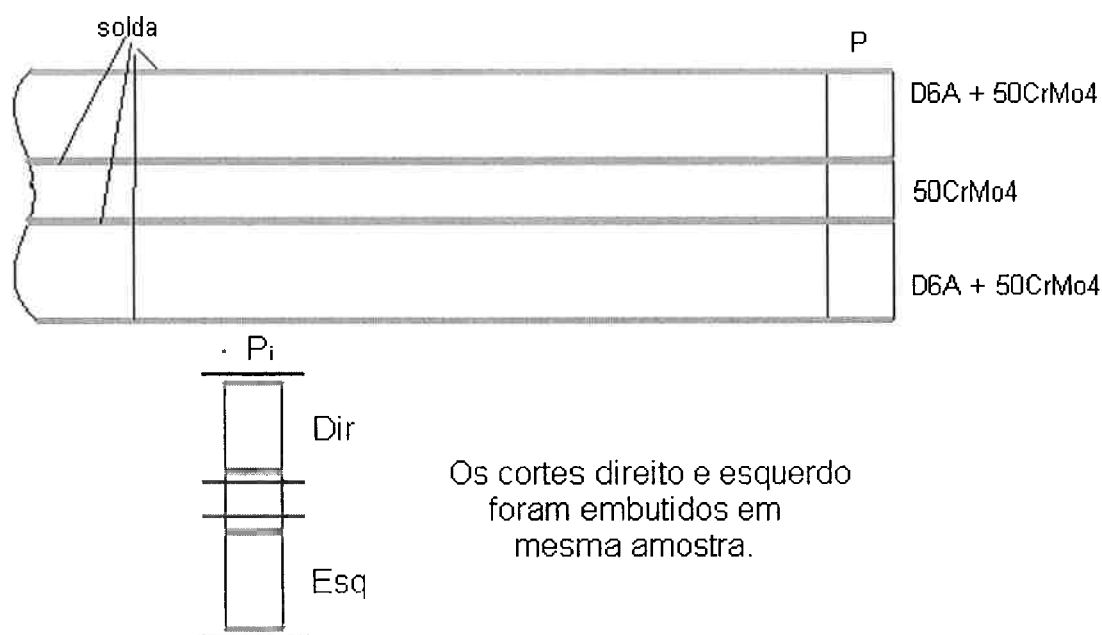


Figura 4.8 - Esquema da preparação de amostras para as chapas 2, 3, 4, 5 e 6

As imagens geradas para estas amostras estão mostradas na seção de resultados e discussões para as chapas 2, 3, 4, 5 e 6.

4.3.3 Preparação de amostras das chapas 7, 8, 9, 10 e 11

As chapas foram cortadas e embutidas de maneira similar as células da segunda laminação. Assim como na segunda laminação, apenas um corte foi realizado para cada produto, e a sessão central (monometálica) foi desprezada, para que os dois lados bimetálicos da chapa fossem arranjados em apenas uma baquelite. Assim, foram embutidas, lixadas e polidas cinco amostras de nome t7, t8, t9, t10 e t11. Estas siglas informam que a amostra ti corresponde ao teste da

terceira laminação para a chapa "i". Na Figura 4.9, segue o esquema das amostras provenientes da terceira laminação.

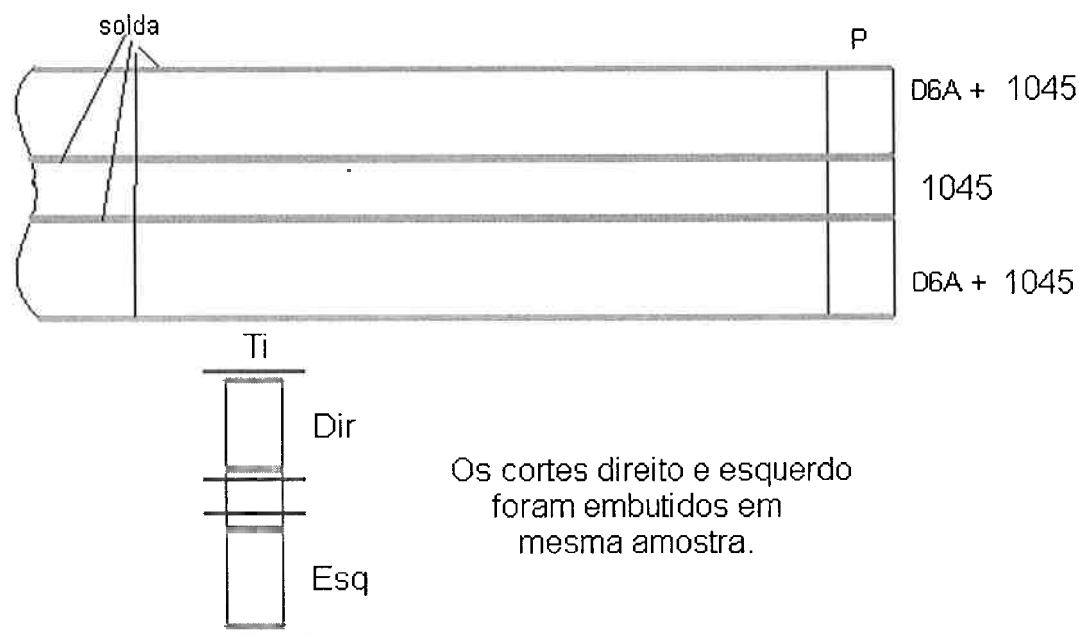


Figura 4.9 - Esquema da preparação de amostras para as chapas 2, 3, 4, 5 e 6

As imagens geradas para estas amostras estão mostradas na seção de resultados e discussões para as chapas 7, 8, 9, 10 e 11.

4.4 Microdureza

Depois de embutidas, as amostras utilizadas na microscopia óptica e de varredura também foram úteis na medição de microdureza dos componentes das chapas. Para isto, foi utilizado um Micromet 5104 Vickers da Marca Buehler (Figura 4.10) disponível no laboratório de metalurgia e materiais cerâmicos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas. As medições foram realizadas conforme o ensaio de microdureza vickers, onde uma pirâmide de diamante, de base

quadrada e ângulo de 136° , é forçada com uma carga constante contra a superfície da amostra gerando uma impressão. As diagonais do losango demarcado na amostra são então medidas pelo microscópio óptico acoplado a amostra. A máquina fornece o valor de dureza Vickers em função do diâmetro da impressão, e também converte estes valores para HRC.



Figura 4.10 - Aparelho utilizado para medidas de microdureza

Uma linha de 5 pontos de análise era respeitada para os dois componentes do sistema bimetalico, conforme a Figura 4.11.

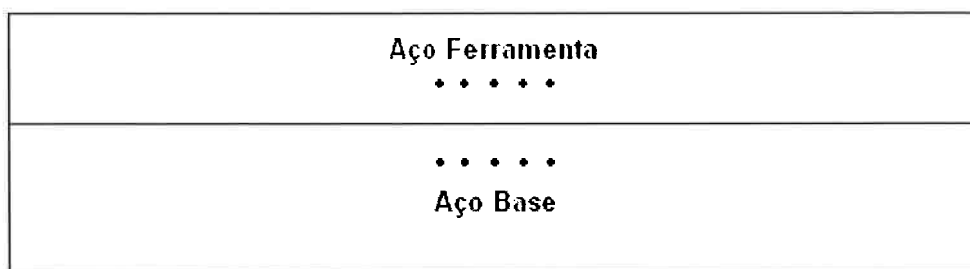


Figura 4.11 - Medição de microdureza

Outro tipo de análise também foi feito posteriormente. Neste caso, diferentes linhas de análise foram utilizadas para o aço ferramenta, de maneira que a dureza do D6a foi medida para diferentes alturas (Figura 4.12).

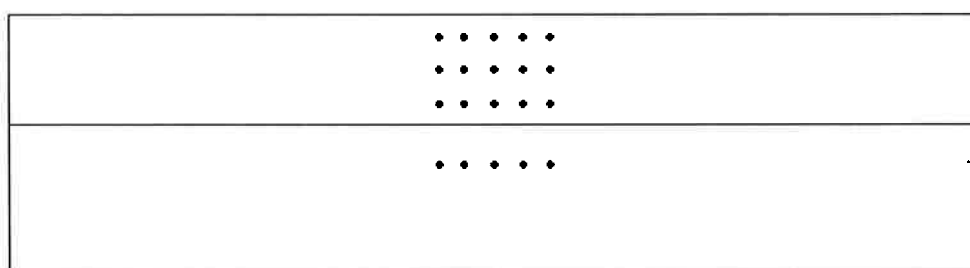


Figura 4.12 - Microdureza para o caso de descarbonetação no D6a

Os resultados da microdureza estão citados mais a frente, no tópico para resultados e discussões.

4.5 Ensaio mecânico de adesão

Os ensaios mecânicos possíveis para a verificação da qualidade de solda em uma chapa clad são diversos. Um ensaio muito comum consiste no ensaio de cisalhamento da peça. Neste ensaio, um mecanismo que distribui uma tensão de cisalhamento na área de contato entre as duas ligas o faz até a ruptura. Um esquema deste ensaio pode ser observado na Figura 4.13. [5]

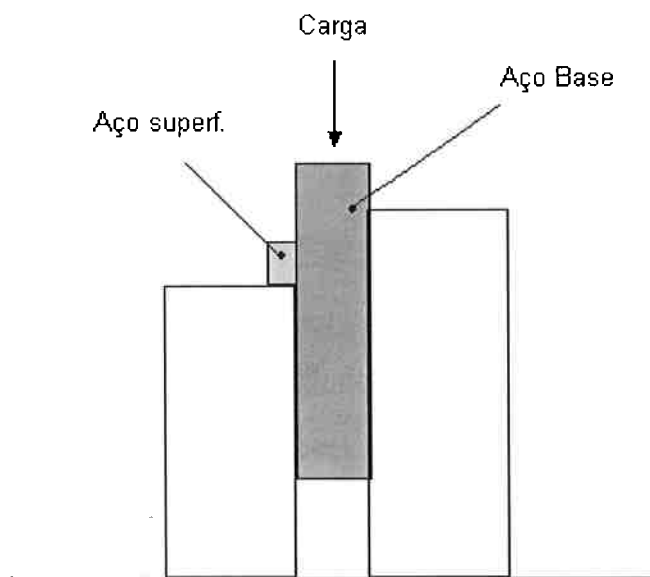


Figura 4.13 - Ensaio mecânico de cisalhamento [5]

Este ensaio de cisalhamento é normalizado. As dimensões da espécie a ser ensaiada derivam de relações com a espessura do aço carbono (aço base). Estas relações tornam o ensaio quase impraticável para as espessuras de chapa utilizadas na produção das lâminas de parâmetro variado da terceira laminação (Chapas 7, 8, 9, 10 e 11). Uma ilustração dessas dimensões segue exemplificada na Figura 4.14.

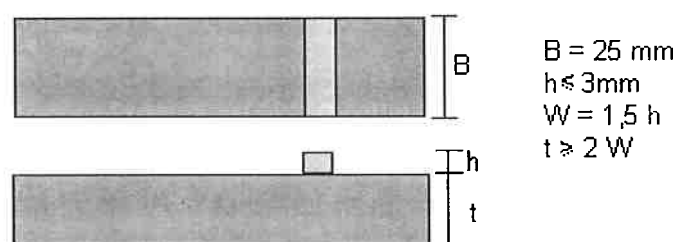


Figura 4.14 - Ilustração das dimensões de uma amostra para o ensaio de cisalhamento.

Para este ensaio, o produto da laminação deve ser usinado de maneira a deixar o aço ferramenta totalmente exposto. Tomando-se as amostras laminadas

destinadas ao ensaio mecânico (células 7, 8, 9, 10, 11), os valores de espessura da chapa de aço ferramenta inferiores a 0,5 mm sugerem um preparo de amostras muito complexo. Desta maneira, optou-se pela realização de um ensaio qualitativo de dobramento.

4.5.1 Ensaio de Dobramento

De acordo com alguns estudos da Japan Steel Works [6] entre outras referências, o ensaio de dobramento é muito eficiente como análise para a qualidade de adesão entre chapas co-laminadas. Este ensaio também é normalizado e confere um resultado qualitativo que deve, portanto, ser definitivo ao caracterizar as chapas laminadas com adesões bem sucedidas.

Para as chapas obtidas como produto da terceira laminação, o ensaio de dobramento pareceu mais apropriado ao caso, de acordo com as pequenas espessuras. Desta maneira, o ensaio foi realizado utilizando-se um punção com características que respeitam a norma (Figura 4.15). Para este ensaio, a norma ASTM exige que o raio de curvatura da peça ensaiada seja quatro vezes maior que a espessura da chapa. Desta maneira, conclui-se que um punção de 12 mm de diâmetro poderia ser uma boa aproximação para todas as peças, que variam em espessuras de 1,5 até 5 mm.

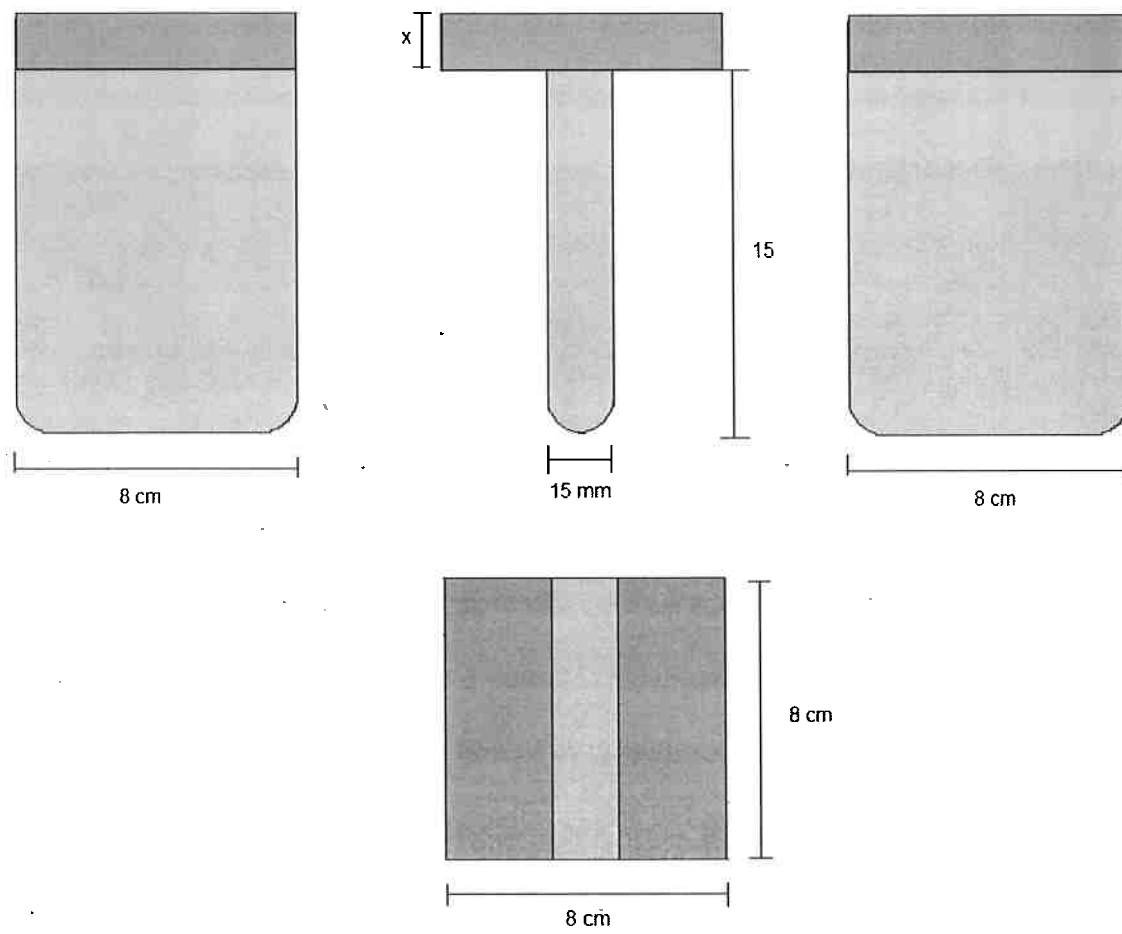


Figura 4.15 - Vistas ortográficas da ferramenta utilizada no ensaio de dobramento

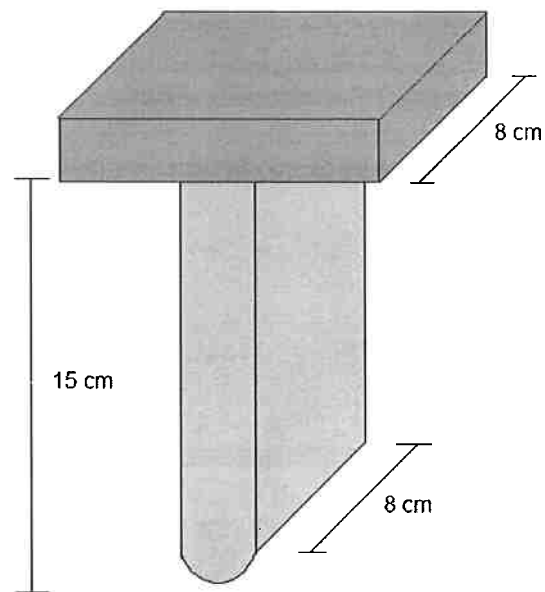


Figura 4.16 - Vista em perspectiva do punção utilizado no ensaio de dobramento.

A peça foi projetada e usinada em aço carbono 1050. O apoio retangular no topo vai de encontro com a prensa e assim assegura a direção de avanço do punção. Um apoio de base foi montado sustentando a chapa. O esquema do ensaio segue mostrado na Figura 4.17.

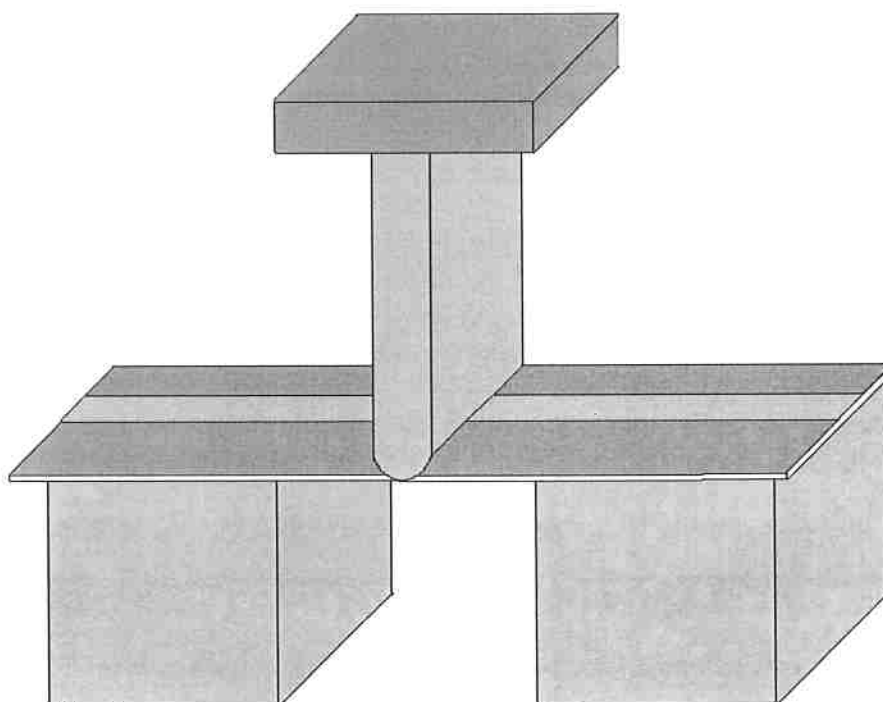


Figura 4.17 - Esquema do ensaio de dobramento

O dispositivo móvel e aplicador de carga utilizado foi uma prensa de 200t como a da Figura 4.18, disponível no Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Todas as peças foram ensaiadas até que alguma trinca fosse evidenciada no aço ferramenta, que não apresenta ductilidade suficiente para um ensaio de 180°.

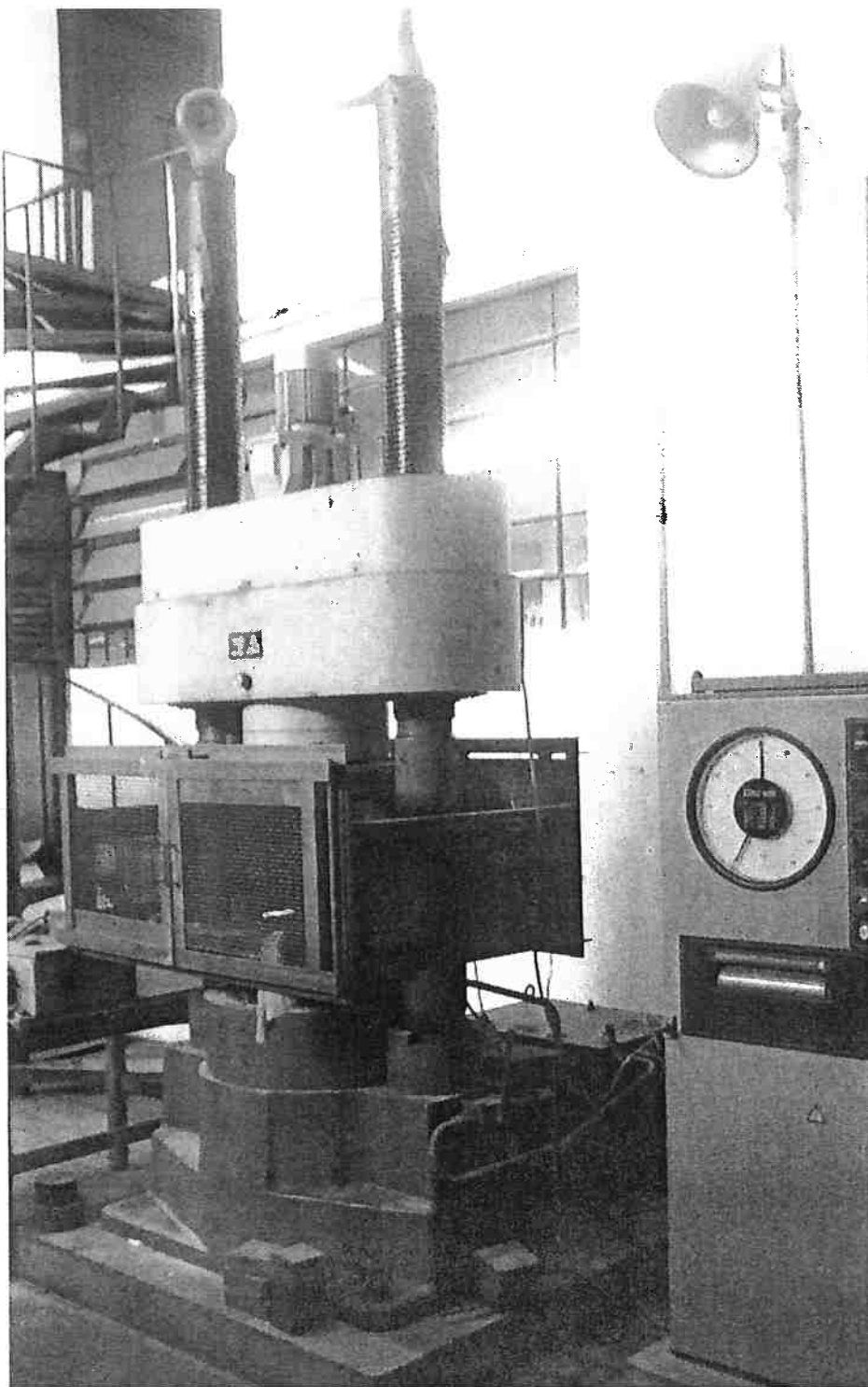


Figura 4.18 - Prensa Hidráulica de 200t utilizada para o ensaio de dobramento disponível no Instituto de Pesquisas Tecnológicas; dept. Metalurgia do pó.

4.6 Teste em campo

As chapas produzidas durante a segunda laminação (chapas 2, 3, 4, 5 e 6) foram utilizadas para produzir 10 protótipos (dois protótipos cada) que foram levados para teste prático em uma colheitadeira. Como dito anteriormente, estas células produziram chapas com 80 cm de comprimento, ou seja, comprimento suficiente para a produção de dois protótipos de 26,5 cm cada. Desta maneira, as chapas foram cortadas, trabalhadas e usinadas para que correspondessem as expectativas de uma lâmina de corte de cana. A Figura 4.19 mostra uma foto de um desses protótipos encaminhados.

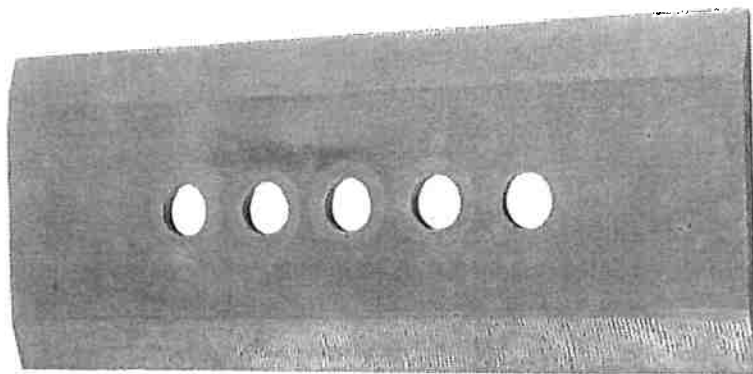


Figura 4.19 - Modelo de protótipo encaminhado para teste em campo. O produto da laminação das amostras 2,3,4,5 e 6 foi devidamente usinado para a produção das lâminas.

O material bimetálico se comportou bem durante a usinagem das lâminas e não apresentou falha de coesão entre os componentes. Devido aos resultados de dureza elevados das chapas produzidas no IPT, metade das amostras foram revenidas antes da usinagem para a redução de tensões internas e aumento de ductilidade do material. Desta maneira, 10 lâminas foram avaliadas, sendo que 5 delas foram tratadas termicamente.

O teste foi realizado alternando-se as lâminas de corte basal de uma colheitadeira com os protótipos fabricados. A idéia deste teste seria, portanto, comparar a eficiência das lâminas bimetálicas com as pré-existentes, e determinar, se possível, uma média de tempo de vida útil desses protótipos.

4.7 Tratamento Térmico

Os resultados da microdureza mostraram que um revenimento poderia melhorar as características das lâminas. Este tratamento térmico foi realizado para metade das chapas utilizadas como protótipos (chapas 1, 2, 3, 4, 5 e 6) e para uma das chapas da terceira laminação (chapa 7). O revenimento foi feito em temperatura de 400°C por uma hora e com resfriamento ao ar. A mudança na dureza dos componentes e as diferenças na microestrutura podem ser observadas mais a frente, no tópico de resultados.

5 Resultados e Discussões

Devido a desvios no processo de produção, a redução aplicada em cada uma das amostras foi diferente da redução teórica. Isto porque o controle sobre a espessura da chapa varia ao longo do produto e a cedagem do conjunto não permite maior precisão. Para a primeira chapa, este desvio foi maior, já que não se tratava de um protótipo a ser testado em prática e os cuidados com a espessura final não foram de suma importância. Nas Tabelas 5 e 6, podemos

verificar estes desvios e assim observar a redução real aplicada ao conjunto.

Estas medidas foram obtidas com a utilização de um micrometro.

Tabela 5 - Espessuras teórica e final das chapas 1, 2, 3, 4, 5 e 6

Chapa	1	2	3	4	5	6
Espessura teor.	2,00mm	3,00mm	3,00mm	3,00mm	3,00mm	3,00mm
Espessura final	2,90mm	3,18mm	3,02mm	3,12mm	3,04mm	3,08mm
Redução total	60,3%	64,0%	65,8%	64,7%	65,6%	65,1%
ε	0,923	1,021	1,073	1,041	1,067	1,052

Tabela 6 - Espessuras teórica e final das chapas 7, 8, 9, 10 e 11

Chapa	7	8	9	10	11
Espessura teor.	3,00mm	3,00mm	5,10mm	3,00mm	1,50mm
Espessura final	2,95mm	3,02mm	5,10mm	3,10mm	1,50mm
Redução total	59,8%	58,9%	30,6%	59,1%	79,6%
ε	0,911	0,890	0,365	0,894	1,590

Estas reduções totais estão aplicadas sobre amostras com diferentes espessuras iniciais de aço ferramenta. Como o aço ferramenta deve ter um

padrão de redução diferente do aço base, a princípio não se deve comparar a redução total com a redução aplicada a nenhum dos dois aços (base ou ferramenta). Desta maneira, é interessante traçar uma proporção entre as espessuras dos dois aços antes e depois da laminação. Devido à espessura das chapas laminadas, esta relação de proporção foi apenas possível utilizando-se um microscópio óptico com medição de comprimento digital pela imagem capturada. Esta verificação segue no tópico “resultados no microscópio óptico”.

Os resultados das laminações foram avaliados por diferentes técnicas já descritas no procedimento experimental, como microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, análise de microdureza, ensaio mecânico de dobramento e teste prático em campo. A microscopia óptica foi útil na observação da interface entre os dois metais. As contaminações presentes nessa interface foram caracterizadas no microscópio eletrônico de varredura, onde uma análise por EDS pôde fornecer algumas informações sobre a composição dessas contaminações. Os resultados obtidos na medição de dureza dos dois aços presentes nos protótipos também ajudaram a prever o desempenho das lâminas que foram testadas em atividade nos meses de agosto e setembro de 2009. Os resultados no microscópio óptico serão primeiramente analisados, onde a qualidade da interface é caracterizada pela ausência de contaminações e pela coesão entre os dois materiais.

5.1 Resultados no microscópio óptico e MEV

5.1.1 Chapa 1

Como dito anteriormente, a primeira laminação rendeu apenas um produto, que foi embutido em amostras A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1 e C2. O primeiro objetivo desta análise era observar a interface entre os dois metais procurando por contaminações. Devido ao número excessivo de amostras para uma só chapa, os resultados aqui mostrados são os de maior relevância no estudo da qualidade de adesão entre os dois metais.

O resultado em regiões distantes das bordas do produto foi uma interface totalmente livre de contaminações para todos os casos. Um exame no microscópio óptico sem ataque metalográfico permite observar a qualidade da interface (Figura 5.1).

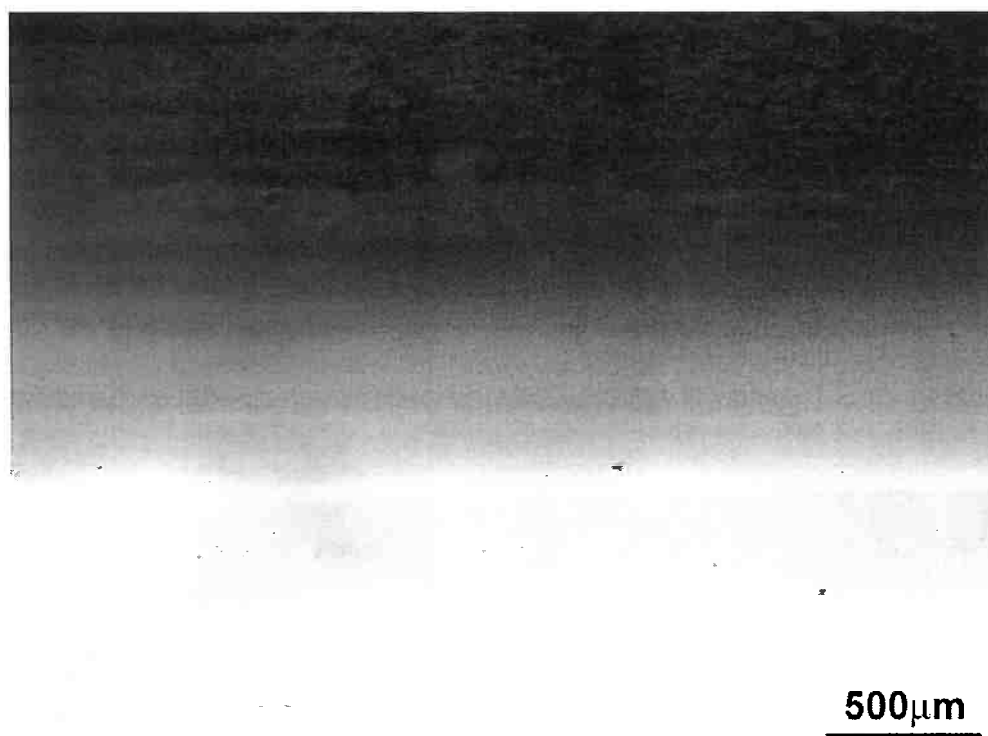


Figura 5.1 - Foto em microscópio óptico da interface da chapa 1; Amostra A1 sem ataque metalográfico; Aumento 32x.

Como observado nas Figuras 4.2, 4.2 e 4.3, todas as células laminadas neste projeto possuem quatro regiões definidas como bordas da região bimetálica. As bordas laterais e centrais apresentaram contaminação. Estas contaminações podem ser devidas à entrada de ar mais provável na borda, que acaba por gerar óxidos metálicos indesejáveis na interface, pode ser resíduo da solda ou falta de adesão (vazio). Por esta razão, a etapa de montagem da célula é extremamente importante, quando a interface deve ser muito bem limpa e preparada para que os átomos dos dois metais possam se aproximar adequadamente como descrito na revisão bibliográfica.

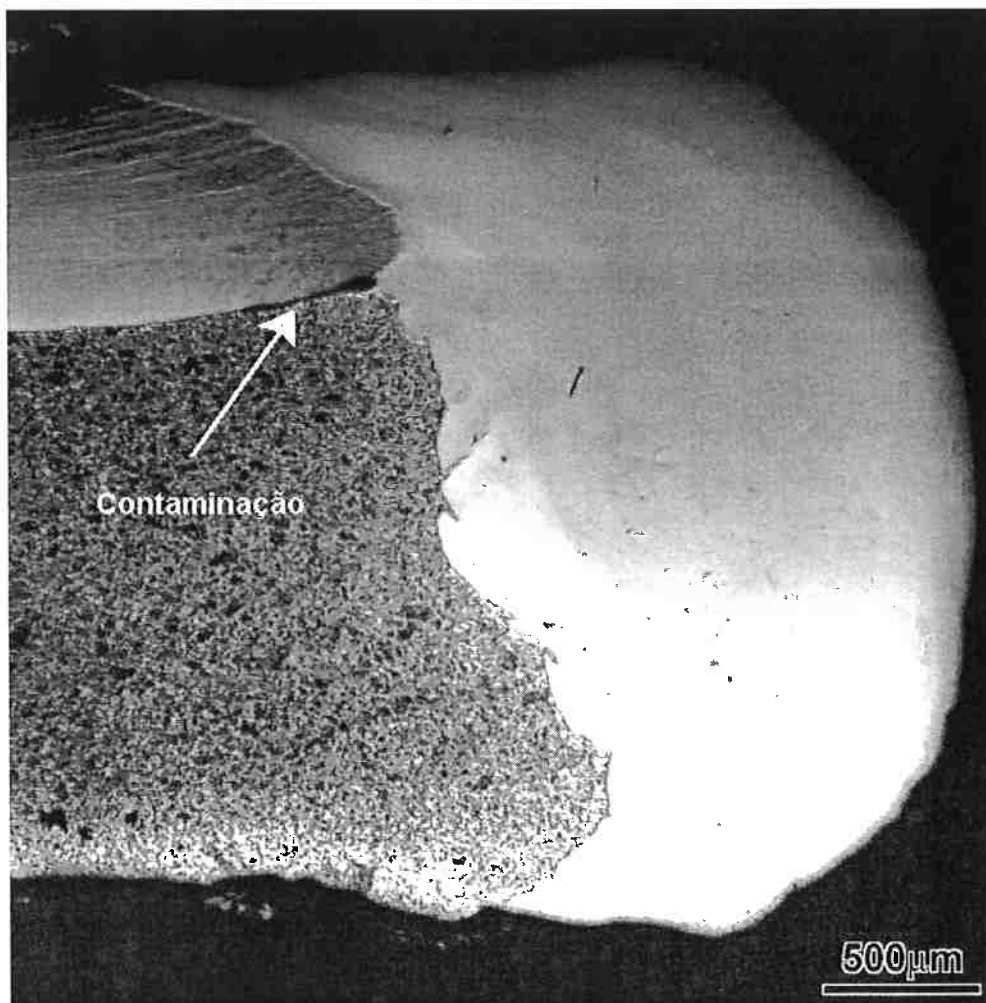


Figura 5.2 - Imagem em microscópio óptico da borda direita da primeira célula laminada mostra contaminação ou vazio na interface tripla ; Amostra B1; Ataque com Nital 5%; Aumento de 32X;

Na Figura 5.2, podemos observar a contaminação na borda da interface tripla referente ao lado de fora direito da célula. A interface tripla corresponde à união dos materiais da pré-soldagem (aço inox 316L) com o aço ferramenta e o aço base. Esta amostra foi atacada com nital 5% para que ficasse evidente a divisão entre os três componentes (aço ferramenta, aço carbono e solda). Fica clara a presença da solda na extremidade direita da figura, e como ela ganhou forma até a base da célula durante a laminação. Esta solda, assim como a

contaminação, deve ser totalmente retirada quando o protótipo for usinado e afiado para o corte. O esquema teórico desta borda no protótipo esta mostrado na Figura 4.6.

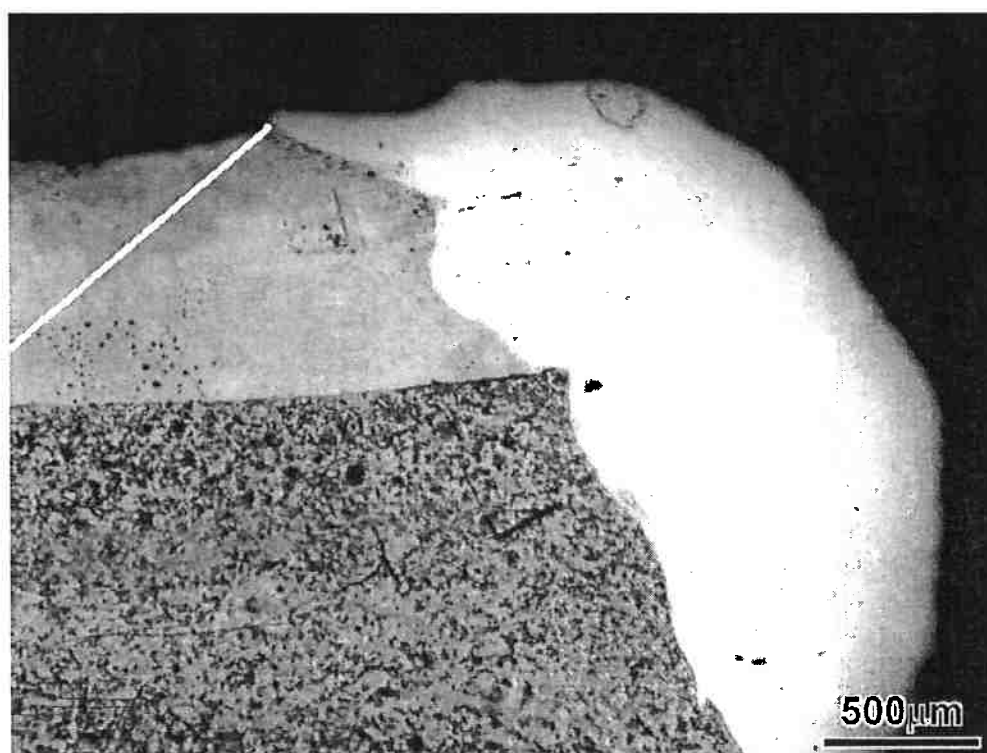


Figura 5.3 - Foto em microscópio óptico com esquema do corte (mostrado em linha branca) a ser efetuado para formar o fio da lâmina; Amostra A1 atacada com Nital 5%; Aumento de 32x.

As contaminações, ou falta de adesão, perceptíveis nas bordas correspondem às regiões da chapa que seriam susceptíveis a falha. As bordas das lâminas realizam o corte, e a soldagem entre os componentes não pode apresentar falha para esta região. Durante a usinagem da lâmina, a parte

defeituosa contendo o material de pré-soldagem e a contaminação deve ser descartada, caracterizando a região de corte.

As bordas centrais (interface tripla central) apresentaram contaminações ou vazios como mostrado na Figura 5.4. Nesta figura, podemos observar novamente a presença do material da pré-solda (aço inox 316L) na região superior, definindo o fim da região bimetálica e o começo da região central da célula 1. O lado referente a figura 10 é o lado esquerdo da lâmina, contrário ao lado das fotos anteriores.

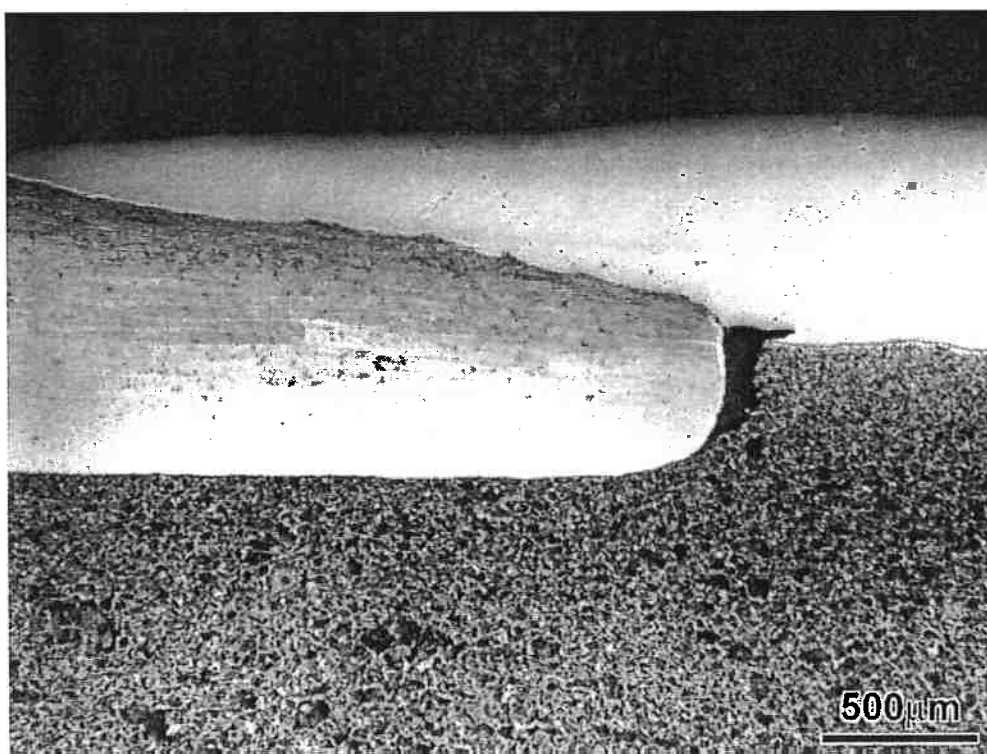


Figura 5.4 - Foto em microscópio óptico do limite da região bimetálica (interface tripla) apresenta contaminação ou vazio ; Amostra A3 atacada com Nital 5%; Aumento 32x.

Para as regiões centrais, a contaminação existente na interface tripla não será eliminada no processo de produção das lâminas. Por outro lado, o centro

das lâminas não estará sujeito às solicitações esperadas para a região de corte. O centro das lâminas dificilmente será causador de uma falha. Isto porque esta interface encontra-se mais ao centro da lâmina e está distante da zona de impacto e das fixações da lâmina sobre a máquina.

O ataque metalográfico das amostras indicou uma microestrutura bem definida para o aço carbono. Como podemos observar na Figura 5.5, o aço base parece apresentar uma microestrutura da austenita transformada em perlita e contornada por ferrita nos contornos dos grãos, como esperado para um aço carbono hipoeutetóide como o 1045.

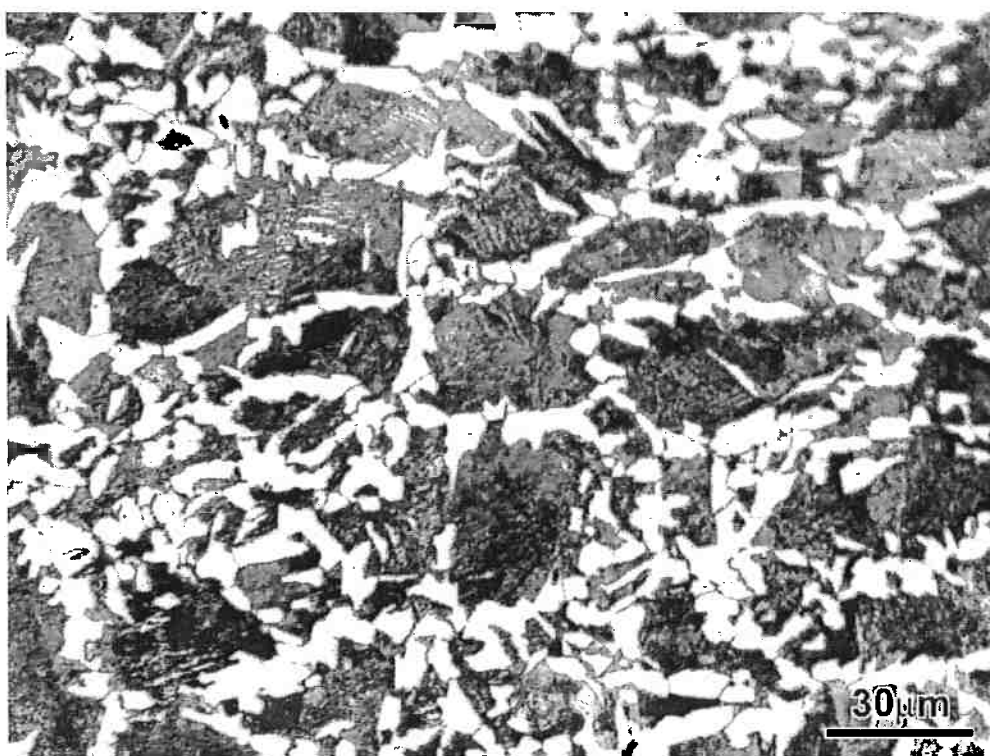


Figura 5.5 - Foto em microscópio óptico que mostra a microestrutura do aço base depois da laminação; Amostra A3 atacada com Nital 5%;

A microestrutura do aço ferramenta, quando atacada com nital 5%, não fica muito bem definida. A matriz deve ser altamente martensítica, o que dificulta a visualização. Ficou claro, durante a observação do ataque no microscópio óptico, que a região superficial do aço ferramenta é preferencialmente atacada. Existe uma possibilidade de que tenha ocorrido descarbonetação nesta região durante o aquecimento no forno. Esta microestrutura está mostrada na Figura 5.6, onde podemos observar uma morfologia acicular. É provável que esta área tenha formado bainita. A diminuição de carbono leva ao deslocamento da curva TTT onde a martensita não é mais formada durante o resfriamento. A Figura 5.6 mostra esta morfologia com ataque em Nital 5%.



Figura 5.6 - Foto em microscópio óptico que mostra a microestrutura do aço D6A depois da laminação próxima a superfície; Amostra A3 atacada com Nital 5%;

5.1.2 Chapas 2, 3, 4, 5 e 6 (protótipos)

Estas chapas, que possuem dimensões equivalentes as das lâminas de mercado, foram embutidas em uma baquelite cada. Desta maneira, foram criadas cinco amostras p2, p3, p4, p5 e p6 descritas na figura 4.8. Esta segunda laminação provou ter sido adequada por apresentar características gerais da interface similares às da primeira com dimensões adequadas para utilização em campo, mas alguns desses protótipos apresentaram contaminação acentuada (até 12mm maiores do que o comprimento descartado posteriormente pelo fio da lâmina). Na Figura 5.7, podemos observar a interface de boa qualidade resultante em quase todas as chapas.

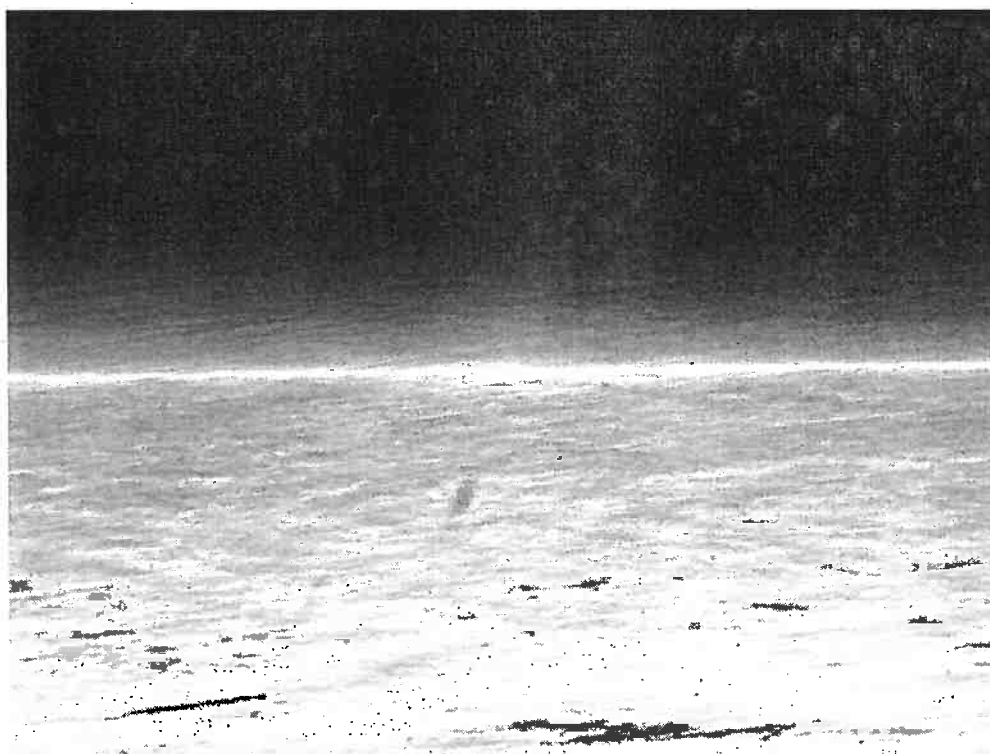


Figura 5.7 - Foto em microscópio óptico que mostra a interface limpa do lado esquerdo da chapa 2; Amostra p2 sem ataque metalográfico; Aumento 32x;

A chapa 5 apresentou uma contaminação mais intensa, com comprimento superior ao comprimento descartado pelo corte (30mm) na interface tripla central do lado esquerdo. Esta contaminação está presente desde a pré-solda central até o meio da região bimetálica. Este problema fica evidenciado na Figura a seguir, que mostra uma montagem com algumas fotos efetuadas em microscópio com aumento de 32x para a amostra p5. A régua na base da imagem indica um comprimento de 500 μ m, o que demonstra que esta contaminação possui comprimento de aproximadamente 150 mm.



Figura 5.8 - Foto em microscópio óptico que mostra uma montagem realizada para a amostra p5 com algumas fotos em microscópio óptico com aumento de 32x. A régua na base da imagem indica um comprimento de 500 μ m. Amostra sem ataque metalográfico.

As bordas de fora apresentaram uma configuração da solda diferente da primeira chapa. As contaminações localizadas estavam novamente presentes, algumas delas mais intensas como na borda direita da chapa 6 (Figura 5.9). A diferente configuração da interface pode ser observada para a mesma região da chapa 6 com ataque metalográfico (Figura 5.10).

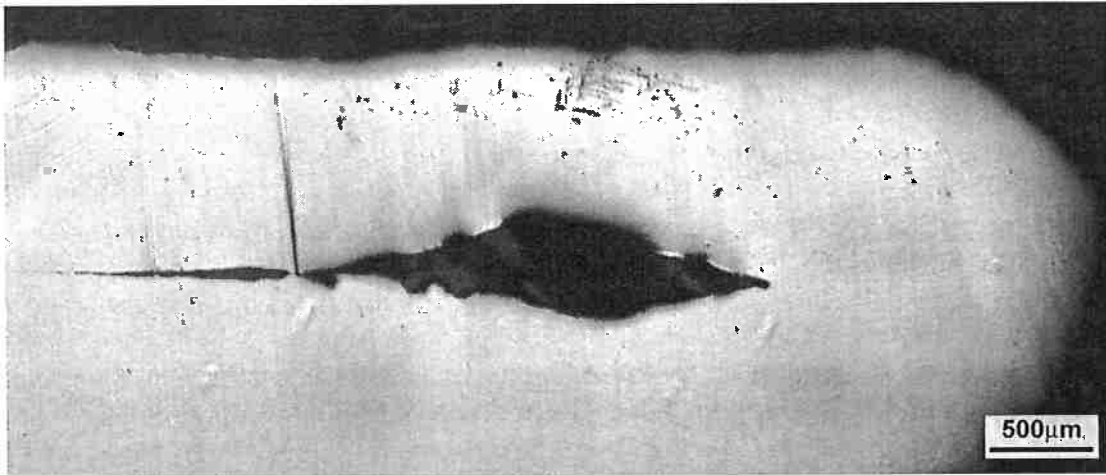


Figura 5.9 - Foto em microscópio óptico que mostra contaminação na borda direita da chapa 6; Amostra p6 sem ataque metalográfico; Aumento de 32x.

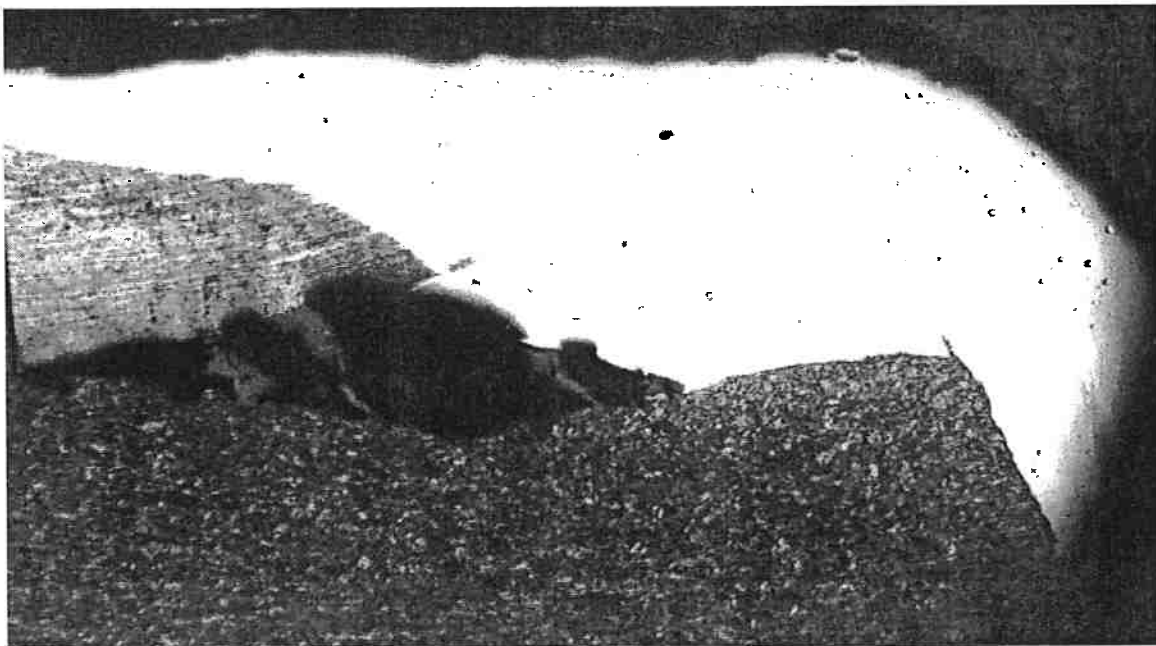


Figura 5.10 - Configuração da interface tripla e contaminação localizada na borda direita da chapa 6; Amostra p6 atacada com nital 5% por 10s; Aumento de 32x.

Pela Figura 5.10, fica claro que o aço inox da solda se espalhou pela superfície da base de maneira mais intensa do que quando comparado a chapa 1. Por esta razão, a contaminação aparece mais distante da "ponta da amostra". Esta configuração apresenta um risco durante a preparação da lâmina, exigindo cuidado para que a ponta de corte não termine sobre o material de solda ou mesmo na região contaminada e susceptível a falhas. A contaminação parece apresentar um "vazio" central, que é mais evidente durante a observação no microscópio. Isso porque a mudança no foco do microscópio óptico deixa clara a diferença de planos de imagem nessa região. Uma foto no microscópio eletrônico de varredura por imagem de elétrons secundários torna a topografia da região mais perceptível.

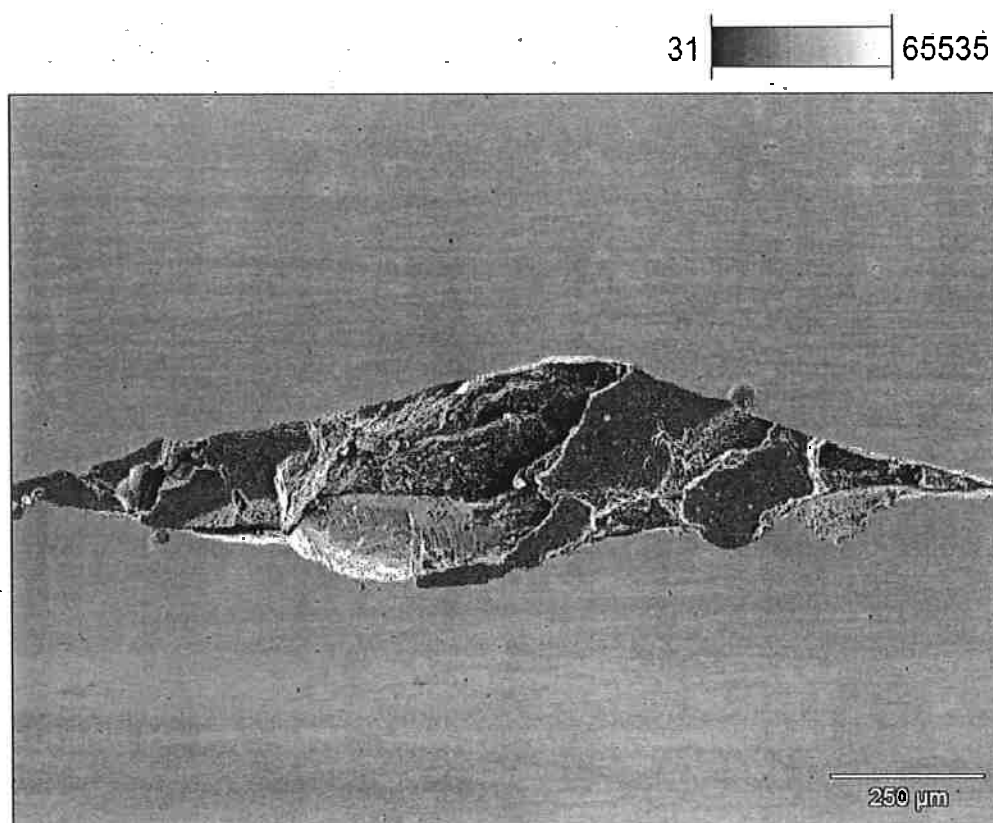


Figura 5.11 - Imagem de elétrons secundários em MEV da contaminação localizada na borda direita da chapa 6; Amostra p6 sem ataque;

A imagem do microscópio eletrônico permite a visualização do "vazio" central e de uma morfologia de fratura. Nesta etapa do projeto, suspeita-se do material (baquelite) utilizado para embutir as amostras. Mais a frente, uma análise por EDS mostra que a composição dessas contaminações remete a escória formada na etapa de pré-soldagem dos componentes. Durante o corte da amostra, antes mesmo de embutir em baquelite, a contaminação já é visível e pode ser observada em uma lupa.

A chapa 6 apresentou uma região defeituosa atípica na interface tripla central do lado esquerdo. A visualização da amostra sem ataque metalográfico leva a crer que a solda se desprende do aço ferramenta durante a laminação, resultando em uma contaminação na interface bimetálica por uma grande extensão (Figura 5.12).



Figura 5.12 - Contaminação atípica na chapa 6; Amostra p6 sem ataque metalográfico; Aumento de 32x.

Neste caso, o ataque metalográfico demonstrou que a fratura não ocorreu entre a solda e o aço ferramenta, e sim unicamente na solda (Figura 5.13). Novamente, fica claro que a região da contaminação possui uma topografia

acidentada, que não permite a visualização de todos os planos de imagem no microscópio óptico.



Figura 5.13 - Fratura no aço inox próxima a interface tripla da chapa 6. Imagem em microscópio óptico; Ataque Nital 5% 10s; Aumento de 32x;

Os defeitos evidenciados nas chapas 5 e 6 não correspondem a qualidade observada ao longo da interface dessas amostras (Figura 5.14) ou mesmo para as bordas de outras chapas. O resultado comum a todas as outras chapas segue exemplificado nas Figuras 5.13 e 5.14. A Figura 5.14, mostra a interface tripla na borda esquerda da chapa 4, enquanto a Figura 5.15 demonstra a qualidade da interface da chapa 3.



Figura 5.14 - Interface tripla na borda esquerda da chapa 4; Ataque com nital 5% por 10s; Aumento de 32x.

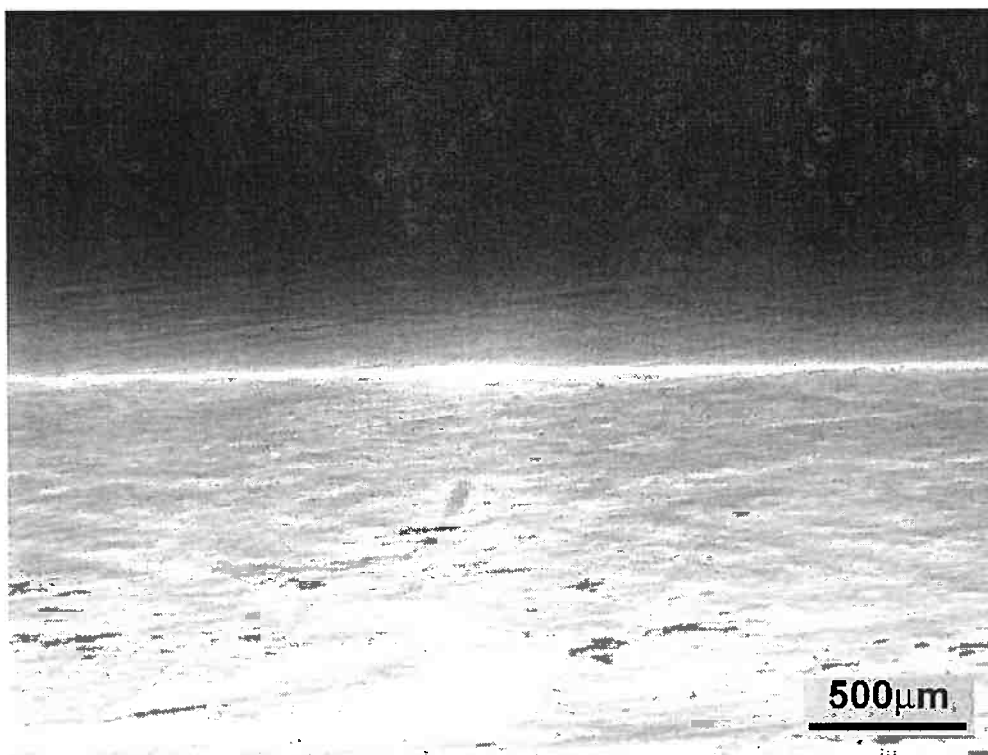


Figura 5.14 - Interface limpa para a chapa 6 assim como a maioria das regiões interfaciais observadas para as outras amostras; Aumento de 32x.

Assim como dito anteriormente, a redução total aplicada nas chapas não deve corresponder à redução aplicada em cada componente do sistema. Espera-se que o aço ferramenta, que apresenta menor ductilidade, seja reduzido minoritariamente. O microscópio óptico foi utilizado para quantificar as reduções aplicadas ao aço ferramenta e aço base (50CrMo4). O resultado está mostrado na Figura 5.14. Este resultado foi obtido para a chapa 3 e indica uma redução de 63% para o aço ferramenta e 67% para o aço base.

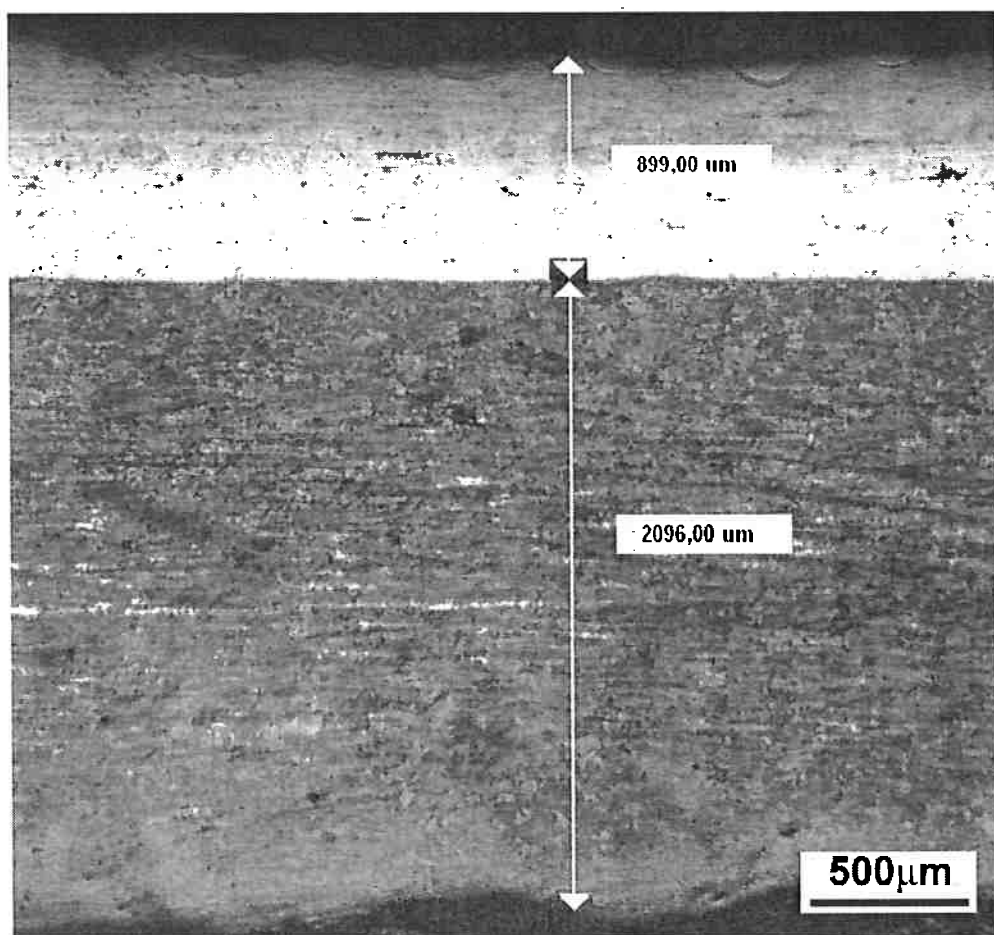


Figura 5.15 - Relação entre espessuras dos componentes da região bimetalica;
Imagem em microscópio óptico com Ataque de Nital 5% por 10s; Aumento 32x;

5.1.3 Chapas 7, 8, 9, 10 e 11

As chapas 7, 8, 9, 10 e 11 foram produzidas para estabelecer alguns parâmetros de laminação. Para os resultados obtidos no microscópio óptico, a presença das contaminações não parece ser influenciada pelo grau de redução aplicado as amostras e pela temperatura de laminação. Isso porque esses defeitos estavam novamente presentes, tanto em amostras com alto grau de redução, como para amostras laminadas a altas temperaturas, e de maneira aleatória (Figuras 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20).

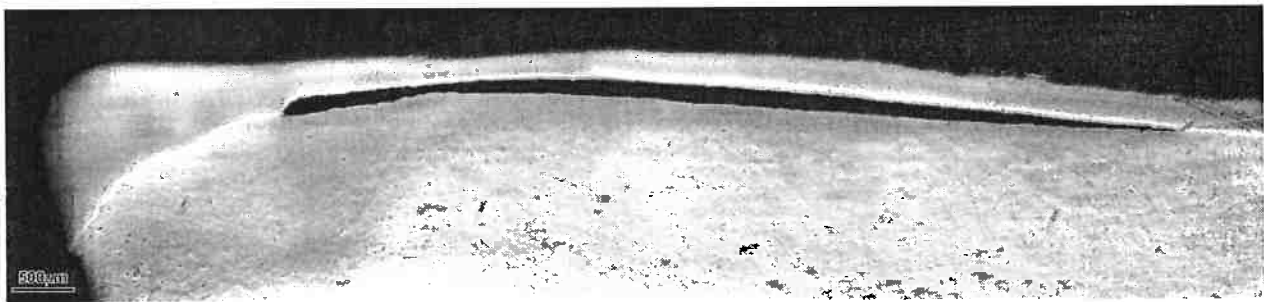


Figura 5.16 - Imagem em microscópio óptico para amostra da chapa com redução de 60% e temperatura de laminação de 1000°C; Aumento 32x;

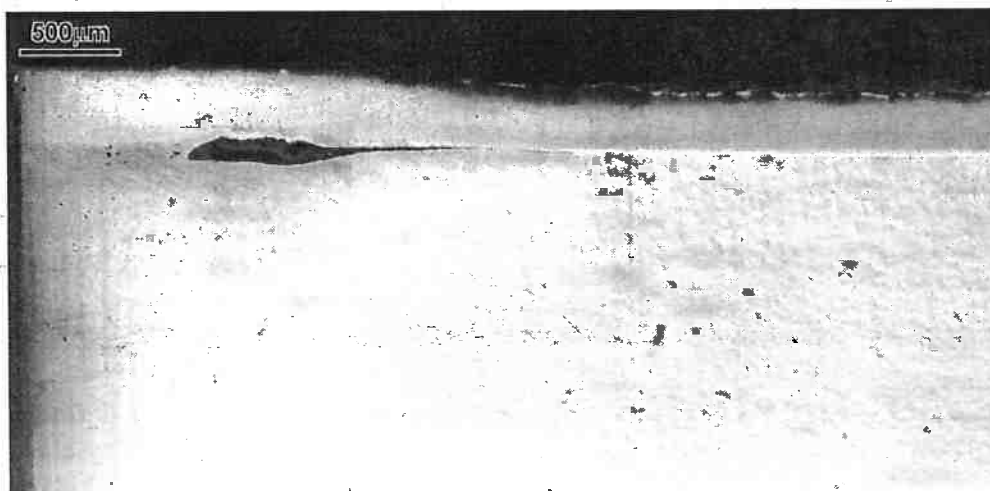


Figura 5.17 - Imagem em microscópio óptico para amostra da chapa com redução de 60% e temperatura de laminação de 1100°C; Aumento 32x;

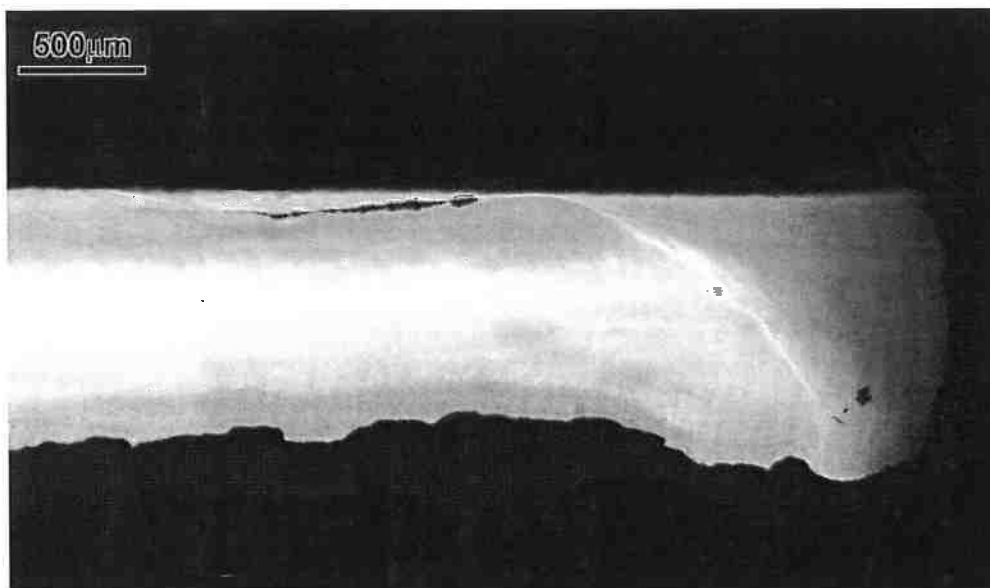


Figura 5.18 - Imagem em microscópio óptico para amostra da chapa com redução de 80% e temperatura de laminação de 1100°C; Aumento 32x;

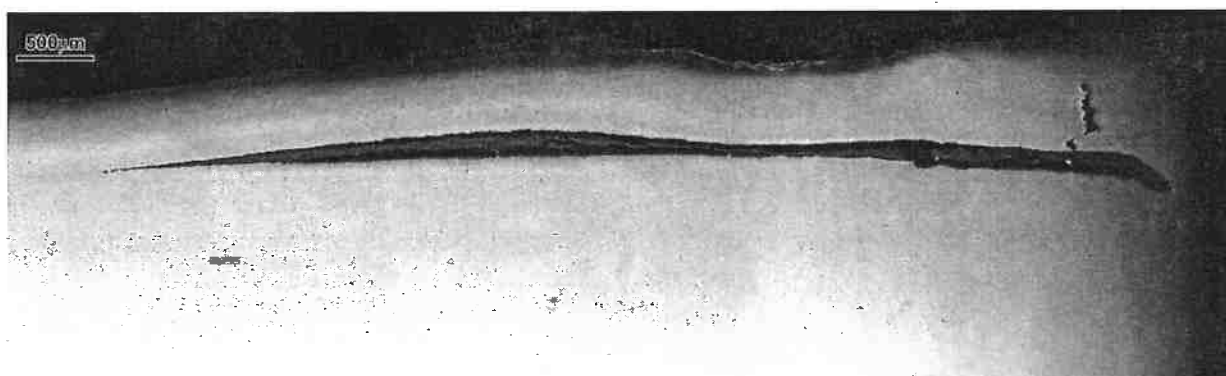


Figura 5.19 - Imagem em microscópio óptico para amostra da chapa com redução de 30% e temperatura de laminação de 1100°C; Aumento 32x;

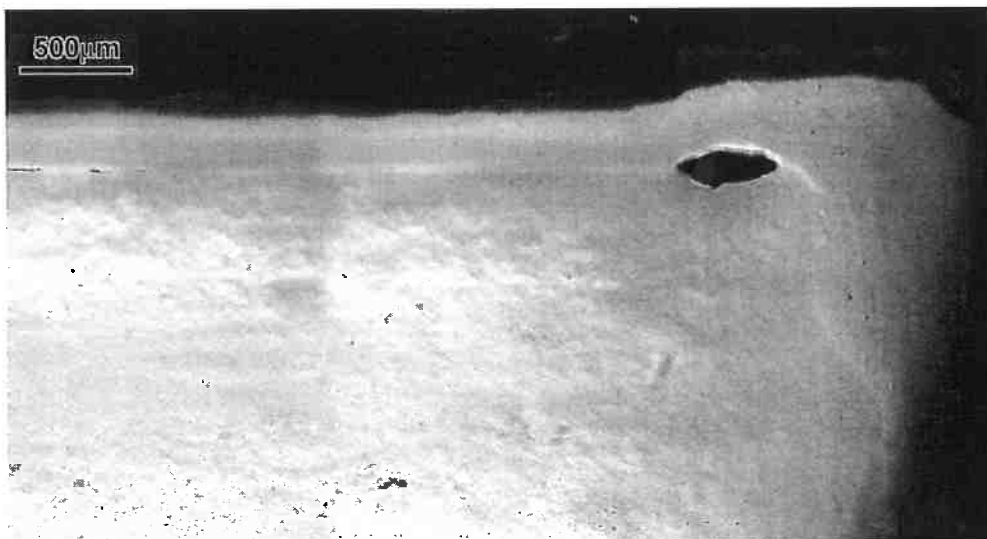


Figura 5.20 - Imagem em microscópio óptico para amostra da chapa com redução de 60% e temperatura de laminação de 900°C; Aumento 32x;

É interessante observar que para reduções muito altas, como no caso da Chapa 11, o material torna-se irregular, impossibilitando sua utilização para a produção das lâminas. Esta característica se deve à deformação alta na superfície de contato com o cilindro e baixa próxima ao centro da chapa.

5.2 Testes de Microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados em diferentes etapas do procedimento experimental para cada conjunto de amostras. As microdurezas da primeira amostra laminada (chapa 1) foram obtidas anteriormente a segunda laminação. Já a segunda análise, para as chapas destinadas ao teste em campo, foi de grande importância para a aplicação do tratamento térmico abordado mais a frente.

5.2.1 Microdureza para a chapa 1

O ensaio 1 foi realizado de acordo com as especificações do procedimento experimental. A dureza Vickers foi obtida para a amostra A3 e B2, em regiões diferentes do aço ferramenta e aço base. Para a amostra A3, a dureza do aço ferramenta foi medida em uma região central, distante da interface. No caso da amostra B2, a dureza foi medida para regiões próximas a interface. Este procedimento não foi proposital, mas forneceu dados discrepantes, que sugerem algum fenômeno de endurecimento próximo à interface. O resultado do ensaio pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultado da microdureza para a chapa 1

Amostras	Componente	Dureza (HV)	Dureza HRC
A3	D6A (Aço Ferramenta)	$560,4 \pm 7,5$	$53,0 \pm 0,4$
	Aço Inox 316L (Solda)	$314,7 \pm 5,7$	$31,6 \pm 0,7$
	1045 (Aço Base)	$219,7 \pm 5,$	-
B2	D6A - solda dir	$697,8 \pm 12,9$	$58,0 \pm 0,6$
	D6A - solda esq	$680,6 \pm 41,8$	$57,2 \pm 2,0$

Os altos valores de dureza para o aço ferramenta parecem estar um pouco acima dos desejáveis para ferramentas de corte susceptíveis a grandes impactos. As lâminas de corte de cana manual de alto desempenho são produzidas com aproximadamente 48 HRC. A região da interface parece apresentar dureza mais elevada, e a causa dessa variação será abordada mais a frente.

O aço carbono (SAE1045) apresentou valores de dureza muito inferiores ao D6A, como o esperado para sua microestrutura perlítica hipoeutetóide. Esta característica pode ser interessante para a resistência ao impacto da lâmina. O aço base deve absorver as energias do impacto da lâmina com o material a ser cortado, o que pode prevenir a formação de trincas no produto.

5.2.2 Microdureza para as chapas 2, 3, 4, 5 e 6

Para as chapas destinadas ao teste prático, o procedimento experimental foi o mesmo. Os produtos da laminação possuíam todos os mesmos graus de redução e as mesmas temperaturas de laminação. Desta maneira, os resultados de dureza esperados para as diferentes amostras é o mesmo. O resultado do primeiro ensaio destas chapas esta exposto na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da microdureza para Chapas 2, 3, 4, 5 e 6

Amostras	Componente	Dureza (HV)	Dureza HRC
Chapa 2	D6A	634,2	57,0
	50CrMo4	473,7	47,2
Chapa 3	D6A	520,1	50,4
	50CrMo4	412,7	41,9
Chapa 4	D6A	669,8	58,8
	50CrMo4	460,4	46,1
Chapa 5	D6A	720,3	60,1
	50CrMo4	450,6	45,3

Chapa 6	D6A	730,5	61,2
	50CrMo4	416,9	42,4

O resultado da microdureza caracterizou um aço ferramenta com dureza muito a ideal, citada anteriormente (página 63). A liga base utilizada (50CrMo4) parece ter respondido a conformação apresentando uma dureza que oscila próxima a das lâminas monometálicas existentes no mercado atual (43-44 HRC). Com o intuito de reduzir a dureza do aço ferramenta, as chapas 4, 5 e 6 foram tratadas termicamente (revenimento). O tratamento térmico foi efetuado na empresa Brasmetal, e os novos valores de microdureza para estas amostras não puderam ser devidamente catalogados. Um teste de dureza rockwell c foi realizado para estas amostras após o resultado em campo.

5.2.3 Microdureza para as chapas 7, 8, 9, 10 e 11

O teste de microdureza para as chapas 7, 8, 9, 10 e 11 foi realizado de maneira diferente. Como dito anteriormente, especula-se que outra fase estivesse presente na superfície do aço ferramenta. Os ataques metalográficos mostram uma região preferencialmente atacada. A possibilidade de que uma descarbonetação possa ter levado a formação de austenita transformada em perlita ou bainita (deslocamento da curva TTT por perda de carbono) nesta região levou a determinação das durezas separadas para a região próxima a interface e próxima a superfície. Os resultados podem ser observados na Tabela 9 e parecem deixar claro que a fase martensítica próxima à interface não está presente da mesma maneira nas regiões próximas a superfície. A microestrutura

acicular encontrada na superfície para as análises metalográficas (Figura 5.6) indica a formação de bainita na região descarbonetada.

Tabela 9 - Tabela de resultados da microdureza para as Chapas 7, 8, 9, 10 e 8RV

Chapas	Componente	Dureza (HV)	Dureza HRC
Chapa 7 Laminada 900°C e red. 60%	D6A (Superfície)	478,5	47,6
	D6A (Interface)	666,7	58,6
	1045 (Aço Base)	279	27
Chapa 8 Laminada 1000°C e red. 60%	D6A (Superfície)	531,2	51,2
	D6A (Interface)	660,1	58,3
	1045 (Aço Base)	275	26
Chapa 9 Laminada a 1100°C e red.30%	D6A (Superfície)	352,8	35,9
	D6A (Interface)	534,2	51,4
	1045 (Aço Base)	--	--
Chapa 10 Laminada a 1100°C e red. 60%	D6A (Superfície)	355,0	36,1
	D6A (Interface)	637,1	57,2
	1045 (Aço Base)	--	--
Chapa 8 Revenida	D6A (Superfície)	478,5	48
	D6A (Interface)	636	57,1
	1045 (Aço Base)	227,7	--

Estes resultados mostram alguma influência da temperatura de laminação para com o nível de descarbonetação. Este fenômeno ocorre no forno, e para as chapas laminadas em temperatura de 1100°C o gradiente de variação de dureza parece ser mais acentuado. Também fica evidente a relação entre o nível de deformação (grau de redução) e a dureza do aço ferramenta.

5.3 Análise por EDS em MEV

A composição química de algumas amostras, preparadas para o microscópio, foi verificada pela técnica de energia dispersiva utilizada no microscópio eletrônico de varredura disponível no Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Estas análises permitiram identificar a composição química das contaminações presentes nas interfaces próximas às bordas do material e quantificar a difusão de átomos de certos elementos de liga através da interface bimetálica.

5.3.1 Análise por EDS das contaminações

As contaminações observadas na interface tripla de muitas das amostras observadas em microscópio, representam, até agora, o maior defeito a ser corrigido para novas laminações. Portanto, fica evidente a importância da determinação da causa e origem dessas contaminações.

Algumas imagens foram capturadas em MEV para a amostra A2, onde a contaminação está centralizada (Figuras 5.21 e 5.22). A Figura 5.21 define bem a localização da contaminação na interface tripla, onde os componentes do sistema podem ser distinguidos com algum esforço. A imagem seguinte define um aumento direcionado sobre esta contaminação e a posição das regiões escolhidas para a análise por EDS. Um ponto e uma área foram escolhidos para criar dois espectros que levantam a contaminação pontual e uma média, respectivamente. Os resultados seguem expostos em seguida (Figuras 5.21 e 5.22).

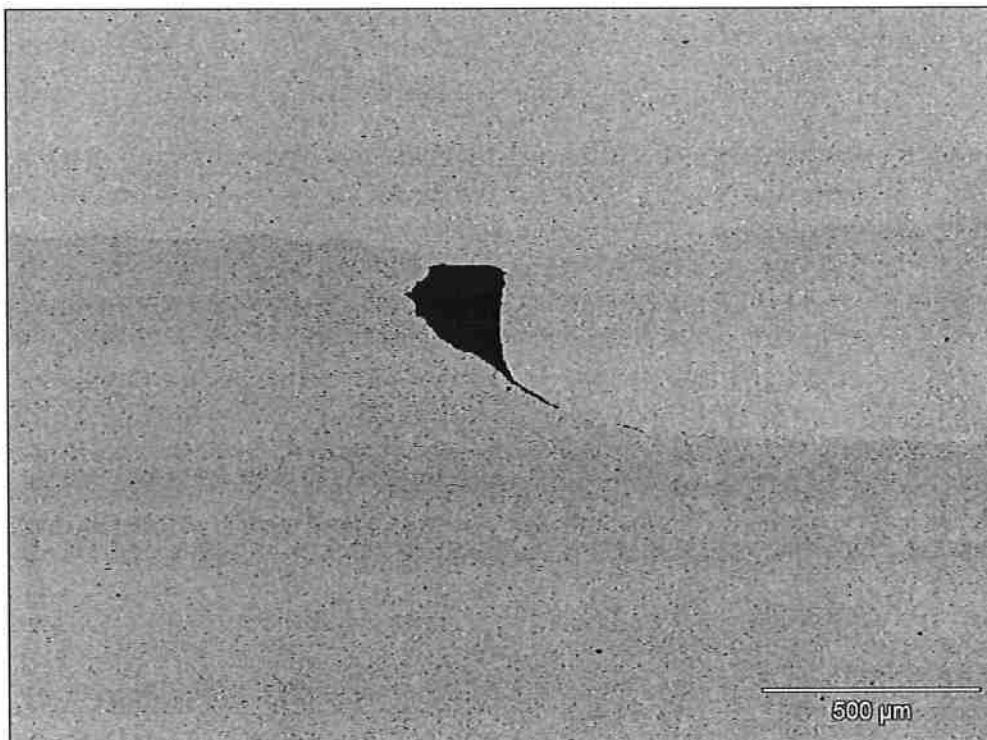


Figura 5.21 - Imagem em microscópio eletrônico de varredura da interface tripla central para amostra A2 da chapa 1;

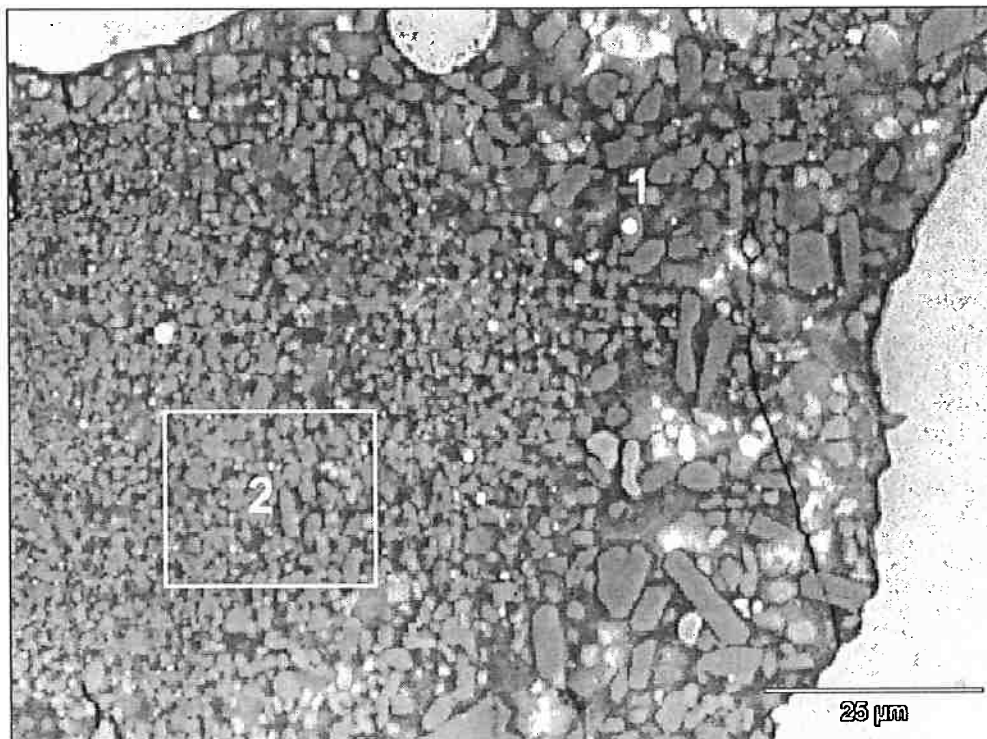


Figura 5.22 - Imagem em MEV da contaminação da interface tripla central para amostra A2; Os itens 1 e 2 representam ponto e área para EDS, respectivamente.

Full scale counts: 5856

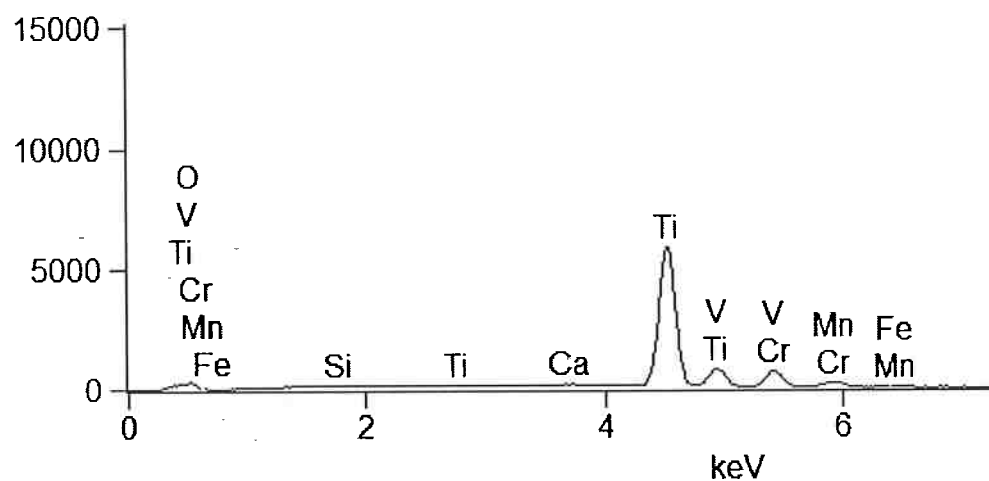


Figura 5.23 - Resultado de EDS realizado para contaminação da amostra A2, chapa 1 sobre o ponto 1.

Full scale counts: 2418

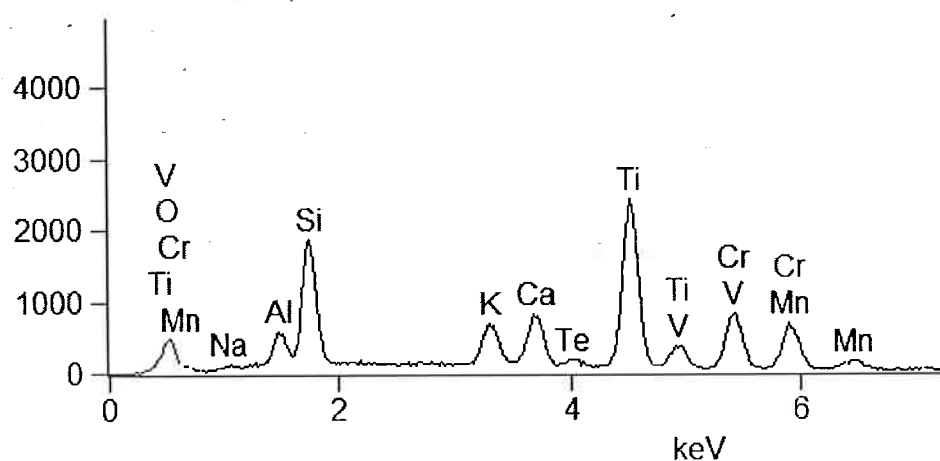


Figura 5.24 - Resultado de EDS realizado para contaminação da amostra A2, chapa 1 sobre a área 2.

Estes resultados apontam para a existência de elementos não encontrados, em quantidade significativa, em nenhuma das ligas componentes do sistema (Titânio, Cálcio e Silício). Mesmo que a liga 50CrMo4 apresente alguma porcentagem em peso de Silício, a amostra analisada tem como aço base a liga 1045.

O sistema de solda pré-laminação, onde um soldador trabalha a moldura das tiras de aço ferramenta sobre o aço base, utiliza solda por eletrodo revestido. O tipo de eletrodo utilizado nesta técnica é consumido durante a soldagem, e possui uma composição característica. Os eletrodos revestidos são constituídos de uma alma metálica rodeada de um revestimento composto por material orgânico e cerâmico, com dosagens bem definidas. A alma metálica costuma ser fabricada em uma liga simples, de preferência compatível com o material a ser soldado. Os revestimentos por sua vez possuem composição química mais complexa e uma grande variedade de funções.

Os componentes do revestimento do eletrodo podem ser: formadores de gás; formadores de escória e materiais fundentes; estabilizadores de arco; desoxidantes; elementos de liga. Na Tabela 10, estão expostos alguns dos constituintes majoritários e suas funções para com o eletrodo revestido.

Tabela 10 - Consituientes majoritários e suas funções no eletrodo revestido

Funções	Elementos Adicionados
Formadores de gás	Celulose, dolomita, CaCo_3
Formadores de escória e fundentes	Argila, talco, TiO_2 , CaCo_3 , SiO_2 , FeO

Estabilizadores de arco	TiO ₂ , silicatos de Na e K
Desoxidantes	Fe-Si, Fe-Mn, Fe-Cr
Elementos de liga	Fe-Ni, Fe-Mn, Fe-Cr

Os componentes orgânicos não devem estar presentes na solda, pois os mesmos são formadores de gás. Os elementos de liga devem se misturar ao material metálico, mas não podem apresentar a composição química associada ao resultado do EDS. Já os componentes cerâmicos, formadores de escória e fundentes, assim como os estabilizadores de arco, parecem possuir composição muito próxima aos resultados (Figura 5.24). Ao relacionar a Tabela 10 com o espectro da Figura 5.24, alguns picos podem ser associados ao óxido de titânio, sílica, carbonato de cálcio e silicatos de potássio. Desta maneira, a principal origem das contaminações fica aqui evidenciada. Esta hipótese sugere que durante a laminação, a conformação mecânica e as diferentes respostas dos materiais a estes esforços geram alguns vazios e um transporte de massa que direciona os contaminantes até a interface.

5.3.2 *Análise por EDS da difusão na interface*

A difusão que ocorre entre os dois metais da lâmina é alimentada por gradientes de concentração. As composições em peso de carbono para o aço ferramenta e o aço carbono utilizados são muito próximas, o que diferencia a difusão estudada neste projeto das estudadas em chapas clad de aço inoxidável [5][6][2]. A técnica EDS utilizada dispõe de uma variação onde o espectro é calculado para uma "linha" escolhida pelo usuário. Neste caso, a linha escolhida obviamente "corta" a interface em direção perpendicular (Figura 5.26).

A técnica foi realizada para alguns elementos de liga dos aços componentes do sistema. O resultado que parece identificar difusão mais significativa foi para o Cromo e o Molibdênio (Figura 5.25). A Figura 5.25 indica exatamente a intensidade do pico para esses elementos em função da distância. A imagem estudada esta evidenciada na figura seguinte (Figura 5.26), onde os dois componentes podem ser distinguidos com algum esforço (existe certa contaminação na interface na base da imagem que facilita a visualização), e a linha de análise é definida pela seta no centro da imagem.

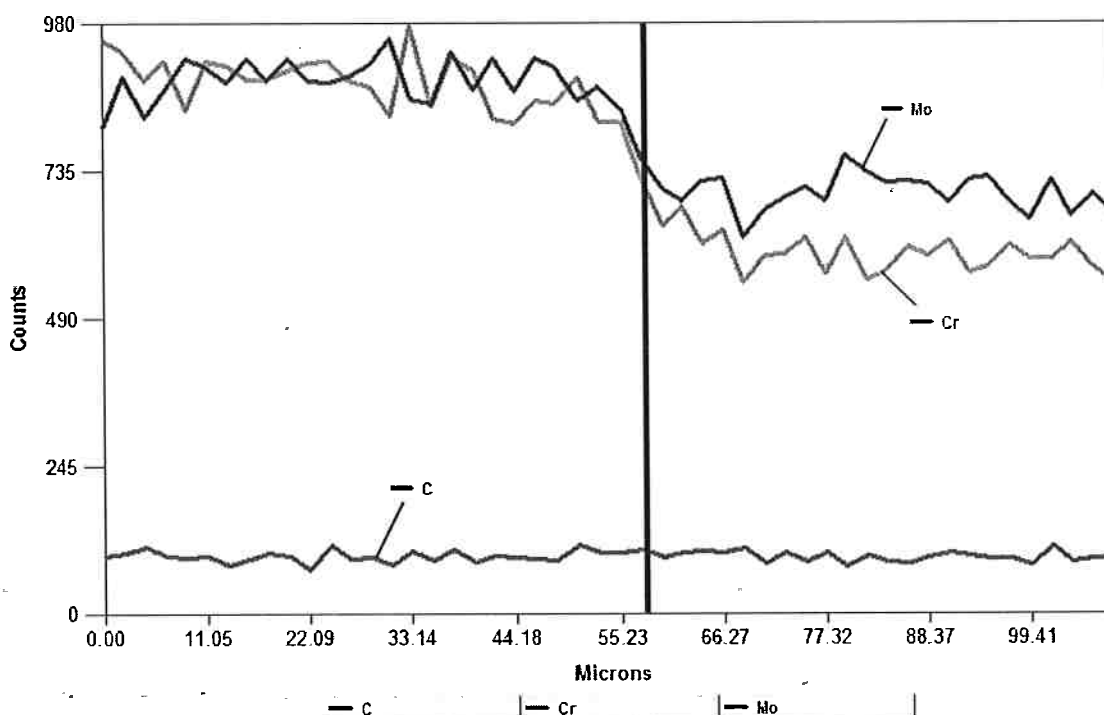


Figura 5.25 - Resultado de EDS realizado em linha pela interface para a chapa 1. O risco central representa a interface. O aço ferramenta (D6a) está disposto à esquerda e o aço carbono (1045) do lado direito.

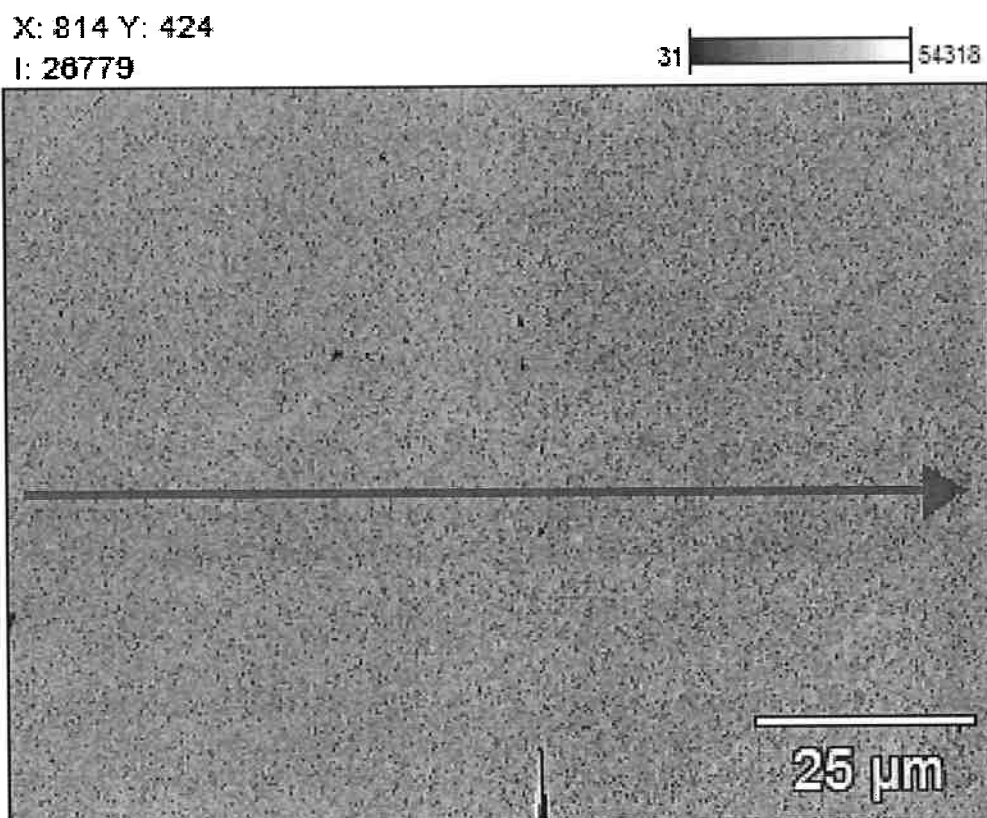


Figura 5.26 - Imagem utilizada para criar resultado de EDS realizado em linha para a interface da chapa 1 da figura 5.25. A seta no centro da figura descreve a linha de obtenção do EDS. O aço ferramenta está disposto à esquerda e o aço carbono à direita. A interface pode ser visualizada com algum esforço no centro da imagem.

Como discutido anteriormente, a difusão de átomos na interface também pode colaborar para a adesão entre os dois materiais. A evidência do fenômeno não pode quantificar a importância da difusão no processo de soldagem sólida, mas um ensaio de adesão para as amostras que foram laminadas para diferentes temperaturas (com diferentes coeficientes de difusão) pode ao menos demonstrar se a difusão pode, ou não, influenciar os resultados a ponto de promover um melhor desempenho no teste de dobramento.

5.4 Ensaio de dobramento

O ensaio mecânico de dobramento foi responsável pela análise qualitativa da adesão entre as duas ligas. A dificuldade encontrada foi a falta de ductilidade do aço ferramenta, como apresentado no tópico 5.2.1, que não permitia grandes deformações e apresentava algumas trincas para a maioria dos ensaios. Analisando essas fraturas, observou-se que mesmo com as trincas originadas no D6a, a interface entre os dois materiais se manteve intacta para quase todos os ensaios. Portanto, de um modo geral, não houve decoesão entre os componentes, mesmo que algumas micrografias tenham apresentado algumas contaminações localizadas, como mencionado no tópico 5.1.

As chapas analisadas foram as produzidas durante a terceira laminação (chapas 7, 8, 9, 10 e 11) com variações de redução e temperatura de laminação. O número pequeno de amostras conduziu a um teste duplo para a chapa 8, onde a influência de um tratamento térmico (revenimento) posterior a laminação foi estudado. Os resultados estão mostrados nas Figuras 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 e 5.32.

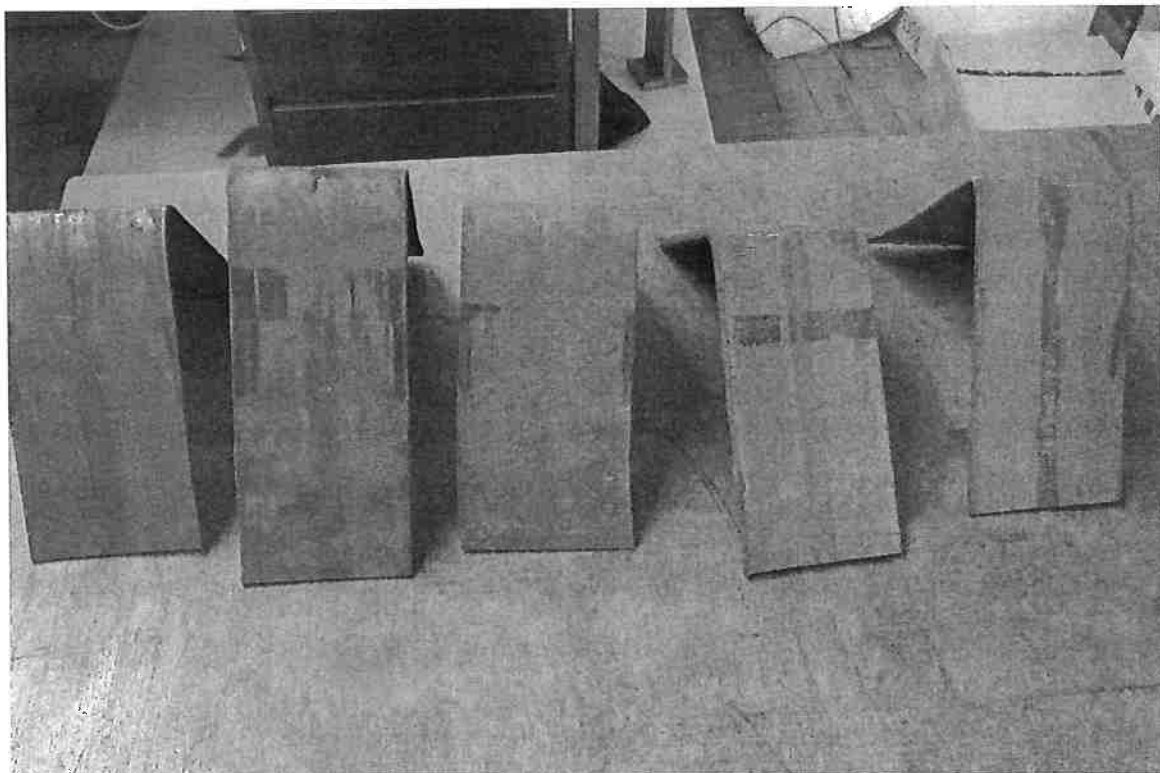


Figura 5.27 - Chapas testadas no ensaio de dobramento. Chapas 7, 8, 9, 10 e 11. O aço ferramenta se encontra na superfície visível.

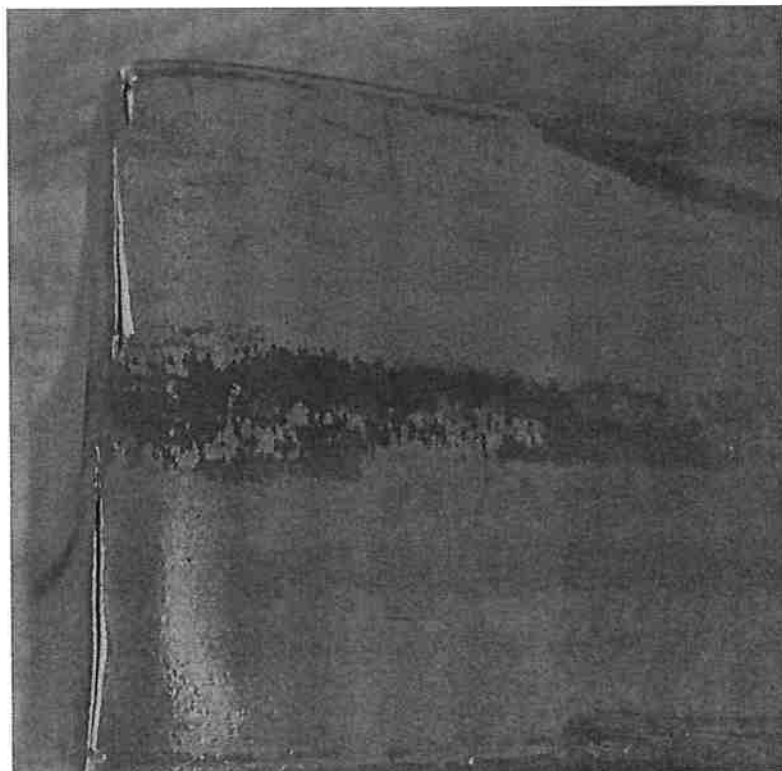


Figura 5.28 - Resultado do ensaio de dobramento para a Chapa 7. O aço ferramenta se encontra na superfície visível. O aço base está disposto na outra face da chapa.

A chapa 7 apresentou trincas no aço ferramenta ao longo da região bimetalica. Além do D6a não ter suportado o ensaio de dobramento, a interface entre os dois componentes apresentou regiões de descolamento, como pode ser observado na Figura 5.28. Esta chapa foi laminada a uma temperatura de 900°C e sofreu redução de 60%.

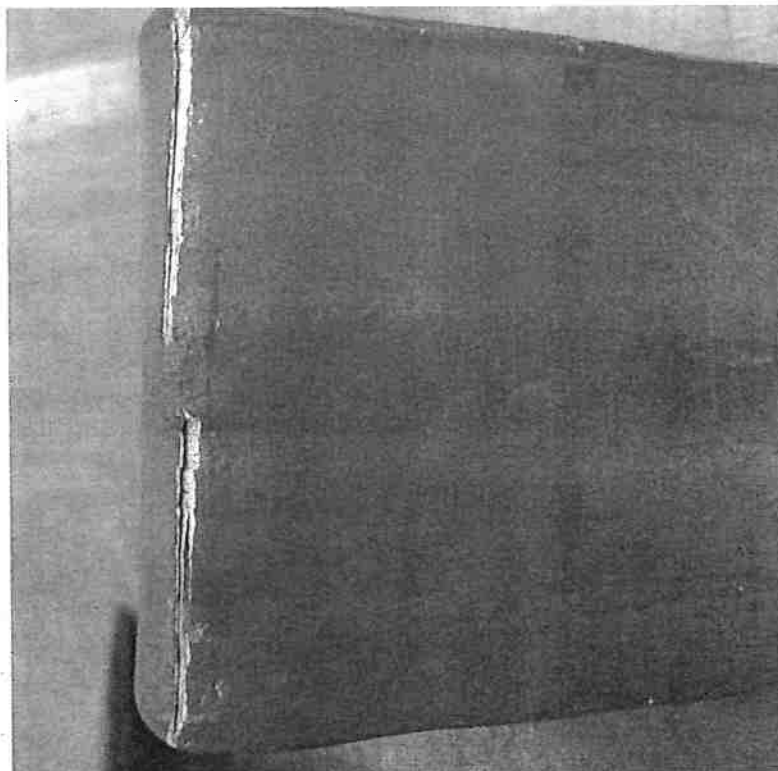


Figura 5.29 - Resultado do ensaio de dobramento para a Chapa 8. O aço ferramenta se encontra na superfície visível. O aço base está disposto na outra face da chapa.

A chapa 8 também apresentou trincas no aço ferramenta, mas a região da interface não apresentou decoesão. Este resultado demonstra que o aço ferramenta não suportou o ensaio de dobramento individualmente, enquanto o aço base (1045) apresentou um bom desempenho. Portanto, a adesão entre os dois aços não apresentou falhas para este ensaio. Esta chapa foi laminada a temperatura de 1000°C e sofreu de redução total de 60% ($\varepsilon = 0,91$).

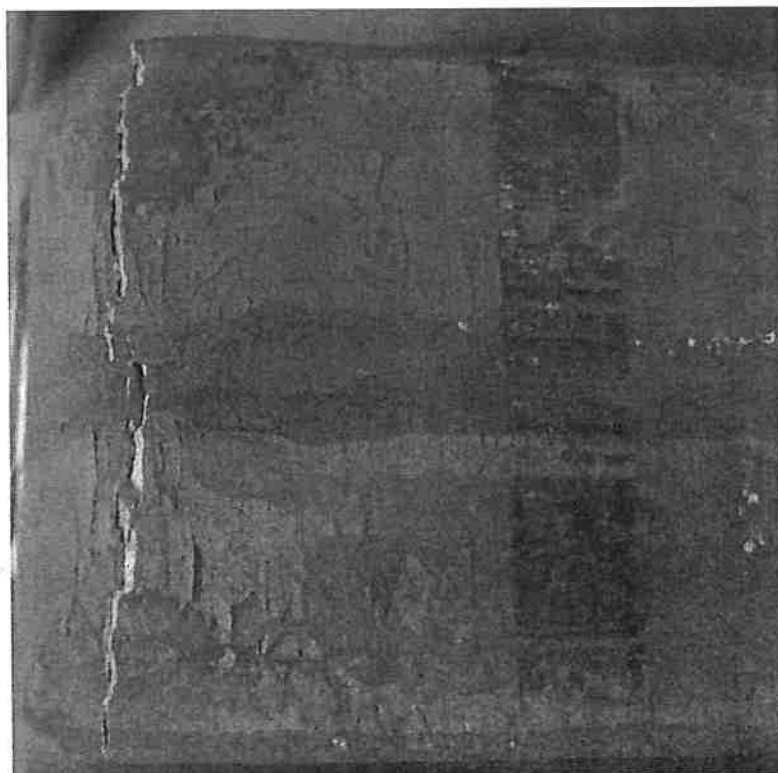


Figura 5.30 - Resultado do ensaio de dobramento para a Chapa 9. O aço ferramenta se encontra na superfície visível. O aço base está disposto na outra face da chapa.

Para a chapa 9, além de trincas no aço ferramenta, algumas trincas também foram evidenciadas no aço carbono. A região monometálica (central) também apresentou falha, evidenciando a intensidade do ensaio para uma chapa dessa espessura. Como o cutelo utilizado foi o mesmo, com raio de curvatura calculado para uma chapa de 3,5mm, o ensaio acabou sendo muito agressivo para uma amostra com espessura de 5,1mm. Observando a região de trincas, constatou-se que houveram algumas falhas de adesão entre os materiais. Em alguns pontos isolados, é possível observar pontos de decoesão, onde o aço ferramenta parece não estar propriamente aderido à base. Estes pontos podem ser observados na Figura 5.30 no lado direito da amostra. Esta amostra foi laminada para uma redução de 30,6% e temperatura de 1100°C.

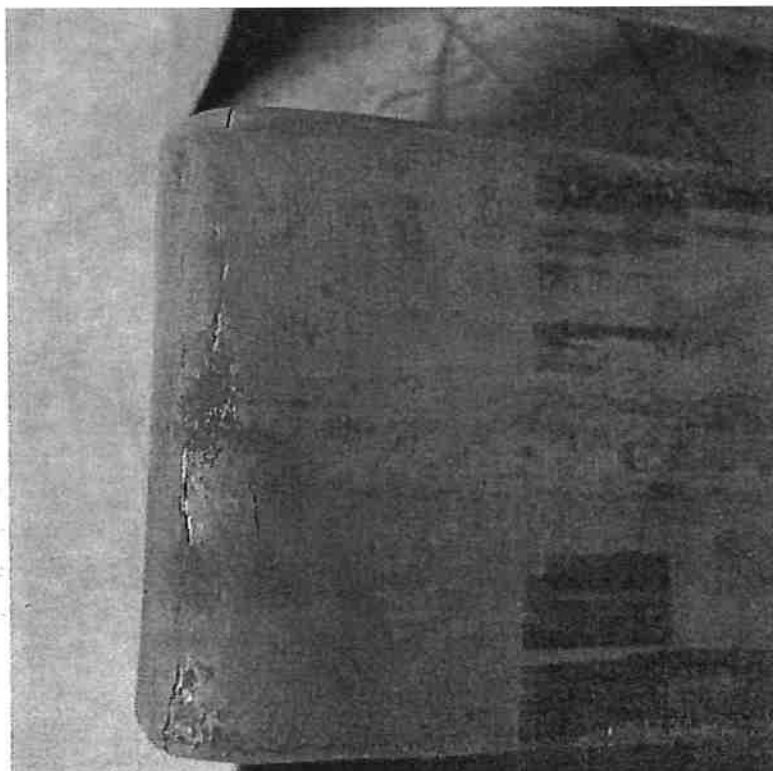


Figura 5.31 - Resultado do ensaio de dobramento para a Chapa 10. O aço ferramenta se encontra na superfície visível. O aço base está disposto na outra face da chapa.

A chapa 10 apresentou algumas trincas no D6a que, como nas outras, tiveram origem nas interfaces triplas centrais e laterais. Estas trincas não chegaram a percorrer toda a região bimetálica, como nos casos anteriores. A interface entre os dois materiais permaneceu intacta, sem que houvesse descolamento algum. O resultado da chapa 10 foi muito satisfatório, e deixa clara a importância da temperatura de laminação na produção destas lâminas. Esta chapa foi laminada a temperatura de 1100°C e sofreu redução total de 60% ($\varepsilon = 0,91$).

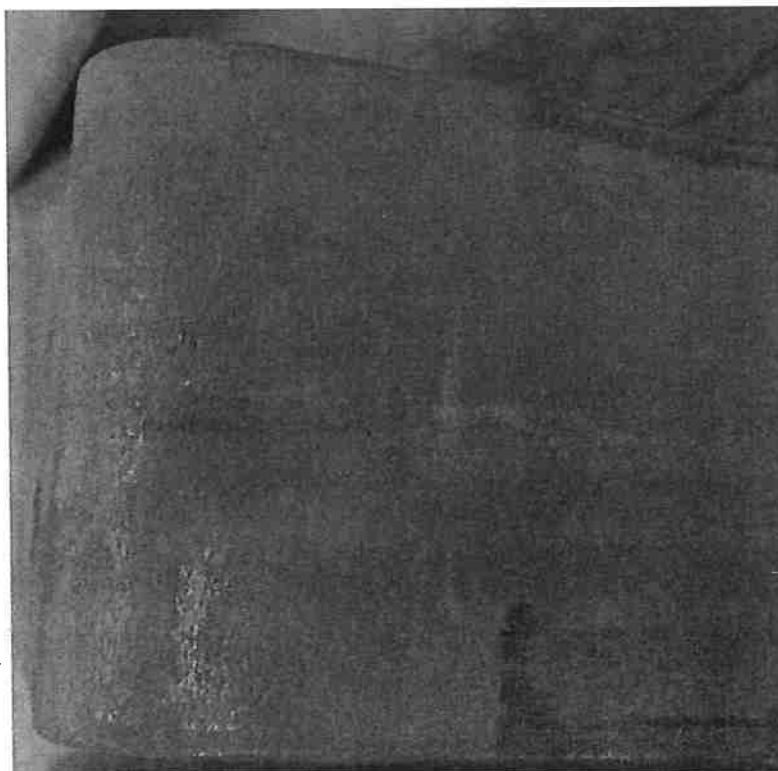


Figura 5.32 - Resultado do ensaio de dobramento para a Chapa 11. O aço ferramenta se encontra na superfície visível. O aço base está disposto na outra face da chapa.

A chapa 11 não apresentou trincas para nenhum dos aços. Este resultado mostrou a influência do grau de redução sobre a soldagem em estado sólido por co-laminação e foi favorecido pela espessura reduzida do aço D6a. Por a chapa possuir a menor espessura de todas as amostras, o ensaio mecânico foi realizado para uma curvatura maior do que a requerida oficialmente, como descrito no tópico 4.5.1. Isto tornou a chapa menos susceptível a falhas durante o teste. Esta chapa foi laminada a temperatura de 1100°C e redução de 80% ($\varepsilon = 1,61$).

A última amostra ensaiada foi a chapa 8 com tratamento térmico de revenimento. A princípio, esperava-se que a redução de tensões internas no aço ferramenta pelo tratamento térmico evita-se a formação de trincas na superfície

da amostra. Como não houve redução significativa de dureza do D6a após o revenimento (Tabela 9), este componente voltou a trincar durante o ensaio. Porém, este ensaio proporcionou um resultado interessante, pois a trinca no aço ferramenta gerou um descolamento próximo à interface tripla central sugerindo uma falha causada pela presença de contaminações. Esta falha pode ser observada na Figura 5.33, que representa bem os possíveis efeitos das contaminações sobre o caldeamento.

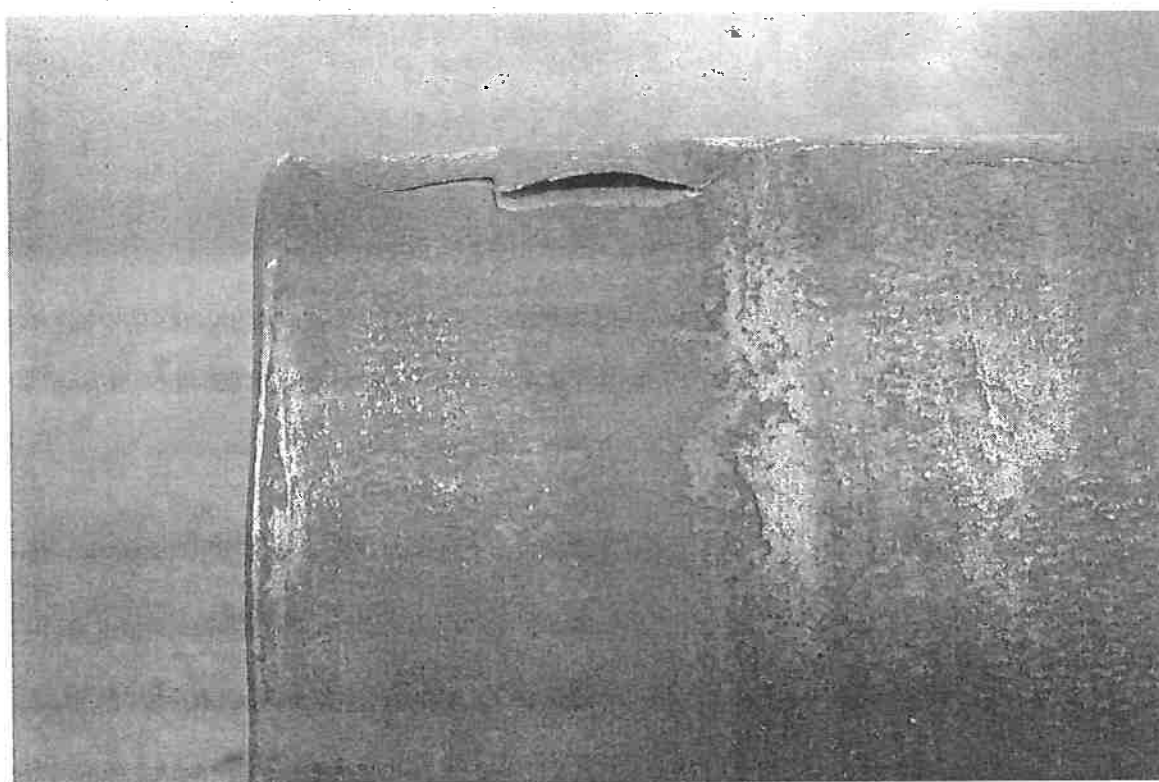


Figura 5.33 - Descolamento provocado por presença de contaminação na chapa 8 revenida após ensaio de dobramento

Os resultados apresentados demonstram claramente a influência direta dos parâmetros de laminação sobre o desempenho da solda. Fixando-se a redução de 60% ($\varepsilon = 0,91$) para as chapas 7, 8 e 10, a variação na temperatura

de laminação mostrou ter grande influência sobre a qualidade da solda medida para as amostras ensaiadas. Os defeitos de descolamento para a chapa 7 parecem ser ainda mais graves que os defeitos existentes na chapa 9. Desta maneira, pode-se entender que a temperatura de laminação parece exercer um maior efeito sobre o caldeamento do que a redução aplicada. A chapa 9, apesar de apresentar pontos de decoesão na interface, também apresentou regiões em que a solda se permaneceu intacta, o que evidencia alguma soldabilidade para um nível inferior (30% - $\varepsilon = 0,365$) ao citado por Tylecote[14] (60%). Mesmo que a chapa 11 tenha aparentemente apresentado o melhor resultado, a chapa 10 parece ser mais próxima de um produto que atenda as condições atuais. Isto porque apresenta um caldeamento de qualidade adequada para um nível de redução inferior.

5.5 Teste em Campo

As chapas enviadas para o teste prático em máquinas colheitadeiras de cana de açúcar foram produzidas na segunda laminação (chapas 2, 3, 4, 5, 6 e 7). Assim como citado anteriormente (pág.3), estes protótipos foram usinados com espessura (3mm) inferior à das lâminas atuais (5mm) para gerar um produto mais eficiente e de menor peso.

O teste estava previsto para setembro de 2009, para que os resultados pudessem dar margem de tempo necessária para possíveis correções. Um período extenso de chuvas atípico não permitiu que as máquinas fossem utilizadas no terreno alagado. Desta maneira, o teste foi realizado no final do mês de outubro.

As lâminas foram fixadas nas máquinas da maneira definida na Figura 1.2. As lâminas utilizadas apresentaram falhas mecânicas (Figuras 5.34 e 5.35) sem o descolamento dos componentes. As lâminas testadas (5 lâminas) foram todas revenidas de acordo com o tratamento térmico definido no tópico 4.7. O nível de dureza das lâminas foi avaliado, e o material base apresentou dureza de 40HRC, muito inferior a dureza comum das lâminas atuais (44HRC). Esta medida de dureza foi tomada de maneira similar as anteriores (tópico 4.4) para as lâminas fraturadas do teste em campo. O aço ferramenta apresentava dureza de aproximadamente 50 HRC na superfície, o que caracteriza bem a dureza de 48 HRC medida para a chapa revenida testada no ensaio de dobramento (Tabela 9).

A chapa revenida e analisada no procedimento experimental (tópico 5.2) apresenta como aço base a liga 1045, o que não corresponde ao material base das chapas utilizadas para produção dos protótipos (liga 50CrMo4). Desta maneira, fica evidente que o revenimento reduziu a dureza do material base (50CrMo4) a níveis indesejáveis. Com a espessura reduzida e material base com níveis de dureza inferiores aos 44 HRC usuais, as lâminas destinadas ao teste em campo não resistiram às solicitações (Figura 5.34 e 5.35) e ficaram em operação por tempo médio de 15 minutos.

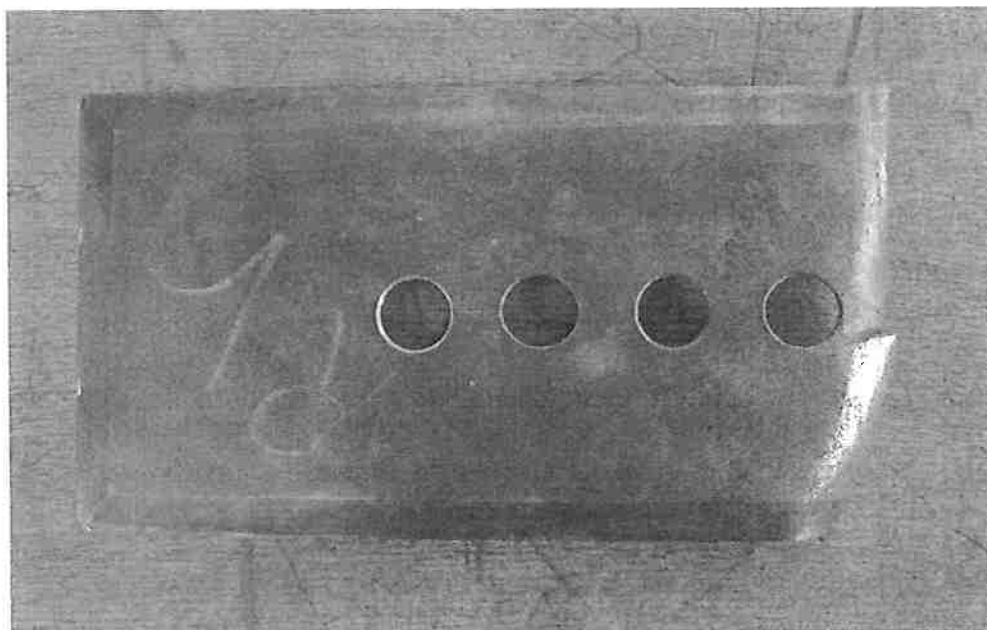


Figura 5.34 - Falha para teste em campo de chapa revenida da série 2 (chapas 2, 3, 4, 5 e 6.

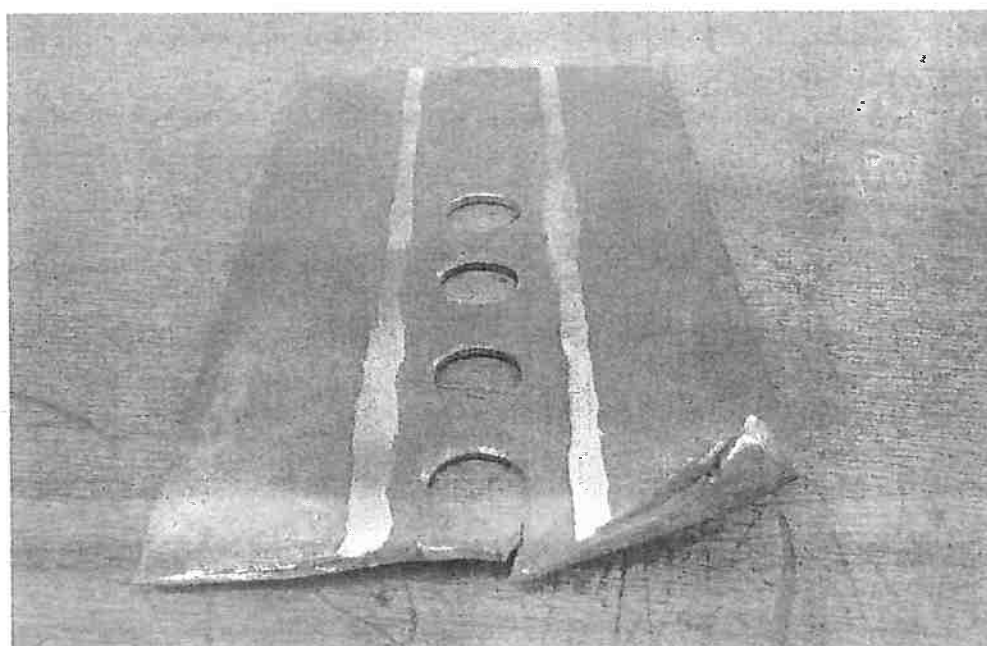


Figura 5.35 - Falha para teste em campo de chapa revenida da série 2 (chapas 2, 3, 4, 5 e 6.

Fica evidente (Figura 5.34 e 5.35) que a falha das lâminas não proporcionou o descolamento entre os dois componentes. A análise da falha

mostrou que a trinca se inicia na região monometálica central próxima ao furo (Figura 5.35), onde o aço base revenido não suporta as solicitações individualmente. Esta trinca evoluiu até a peça ficar "pendurada" na ponta com dobra visível na figura 5.35.

Estes resultados sugerem um futuro teste em campo com amostras não revenidas, onde o aço 50CrMo4 apresenta dureza próxima à de lâminas utilizadas no mercado (Tabela 8). Como visto no ensaio de dobramento (tópico 5.4), mesmo que a superfície do aço ferramenta venha a trincar durante as solicitações por alta dureza (Tabela 8 e tópico 5.2.2), a interface entre os dois materiais pode permanecer intacta, tornando a lâmina ainda funcional. Este teste em campo evidenciou a importância do material base e sua função estrutural sobre o produto. Os testes com as lâminas sem tratamento serão realizados junto a uma nova série de lâminas de espessura alterada (equivalente as lâminas de mercado com 5mm de espessura).

6 Conclusões

De acordo com os resultados obtidos para todos os experimentos e a revisão teórica abordada, conclui-se que:

- Para a montagem das amostras a serem laminadas, a presença de um chanfro de base para o aço ferramenta mostrou-se desnecessária. As lâminas produzidas para o ensaio de dobramento (ensaio de adesão) e protótipos para teste em campo não utilizaram chanfro de base (Figura 4.2 e 4.3) e apresentaram caldeamento (tópico 5.4 e 5.5).

- A comparação de desempenho no ensaio de dobramento, para as chapas que tiveram seus parâmetros de laminação variados, indicou uma melhor adesão para chapas com temperatura de laminação de 1100°C e grau de redução de 60% (tópico 5.4).

- As contaminações, evidenciadas em algumas regiões da interface próximas as bordas, foram relacionadas com a escória formada pelo eletrodo-revestido utilizado para a soldagem pré-laminação dos conjuntos. A natureza cerâmica deste revestimento possui composição semelhante à obtida por EDS realizado nas amostras embutidas (pág. 70-71). Desta maneira, conclui-se que uma soldagem MIG/MAG (arco elétrico com gás de proteção e eletrodo não revestido) deve diminuir consideravelmente o número de contaminações.

- O ensaio de dobramento foi suficiente para um critério de comparação entre a qualidade da solda em estado sólido para as chapas ensaiadas, mesmo com o aço ferramenta não suportando o ensaio individualmente. Por outro lado, o ensaio de cisalhamento deve fornecer dados numéricos interessantes à caracterização das chapas. O aço D6a também deve ter uma resposta mais apropriada para este tipo de ensaio (tópico 5.4).

- O aço D6a apresentou descarbonetação durante sua exposição a altas temperaturas no forno durante a laminação. A diferença de microestrutura entre a superfície do aço e a interface bimetalica denuncia o fenômeno junto com grandes variações de dureza. Como as solicitações da lâmina ocorrem na superfície do aço ferramenta (região afetada pela descarbonetação), conclui-se que o aquecimento das amostras no forno pré-laminação deve ser realizado com atmosfera controlada (pág.51).

- O tratamento térmico conseguiu reduzir as durezas dos componentes laminados, mas parece ter sido mais significativo para o aço base (50CrMo4) do que para o D6a. Isto levou a perda do controle sobre a relação dureza/tenacidade do material e à falha das lâminas durante o teste em campo (tópico 5.5).

- Para as amostras ensaiadas, a temperatura de laminação mostrou-se mais eficaz sobre a qualidade de adesão do que o grau de redução aplicado. Os mecanismos de adesão influenciados pela temperatura de laminação poderiam ser: o limite de resistência da camada de óxidos superficiais e a difusão (tópico 5.4).

7 Referências

[1-16]

1. Syub, S.C.P.M.N.H.S.W., *Analysis of asymmetrical cold and hot bond rolling of unbounded clad sheet under constant shear friction*. Journal of Materials Processing Technology, 2006. **177**: p. 114-120.
2. Yeong-Maw Hwang , G.-Y.T., *An analytical approach to asymmetrical cold- and hot-rolling of clad sheet using the slab method*. Journal of Materials Processing Technology, 1995. **62**: p. 249-259.
3. Chen, L., *Clad metals, roll bonding and their applications for SOFC interconnects*. Journal of Power Sources, 2005. **152**: p. 40–45.
4. Shirzadi, A. *Diffusion Bonding*. [cited; Available from: <http://www.msm.cam.ac.uk/phasetrans/2005/Amir/bond.html>].
5. Gonçalves, M., *Efeitos das principais variáveis de processo sobre as características das interfaces de chapas de aço carbono revestidas com aço inoxidável ferrítico obtidas por co-laminação*, in *Escola Politécnica da USP*. 1985, USP: São Paulo. p. 156.
6. Department, P., *Fabrication of pressure vessels using hot rolled clad Plates*, in *Japan Steel Works Technical Report*. 1978, Plates Department.
7. Shirzadi, A., *Interface evolution and bond strength when diffusion bonding materials with stable oxide films*. Journal of Surface and Interface Analysis, 2004. **Vol 31**: p. 609-618.
8. Birks, N., *Introduction to high temperature oxidation of metals*. 1983, Londres.
9. PAUL, A., *The Kirkendall Effect in Solid State Diffusion*, in *Laboratory of Materials and Interface Chemistry*. 2004, University of Technology.
10. Lancaster, J.F., *Metallurgy of Welding*. 5 ed. Vol. 1. 1993, London: Chaoman & Hall.

11. Masahashi, N., *Microstructure and properties of iron aluminum alloy/CrMo steel composite prepared by clad rolling*. Journal of Alloys and Compounds, 2004. **379**: p. 272–279.
12. Lenard, J.G., *Primer on flat rolling* 2007 Amsterdam: Elsevier.
13. Joaquim, R. *Soldagem por eletrodo revestido*. 2003 [cited; Available from: http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=713].
14. Tylecote, R.F., *The Solid Phase Welding of Metals*. 1968, Londres: Arnold.
15. *Welding handbook* 5th ed ed. 1962, New York American Welding Society.
16. Linnert, G.E., *Welding Metallurgy*. 3 ed. Carbon and Alloy Steels. Vol. 1. 1965, New York.