



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia da UFMG



**Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas - Mestrado Profissional**

Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE DUPLO MAÇARICO PARA AJUSTE DO
DIMENSIONAMENTO DE PLACAS DE AÇO.**

Autor: Fabrício Domith Rodrigues

Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

Novembro/2019

Fabício Domith Rodrigues

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE DUPLO MAÇARICO PARA AJUSTE DO
DIMENSIONAMENTO DE PLACAS DE AÇO.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas da Universidade Federal de
Minas Gerais.

Área de Concentração: Metalurgia da Extrativa.

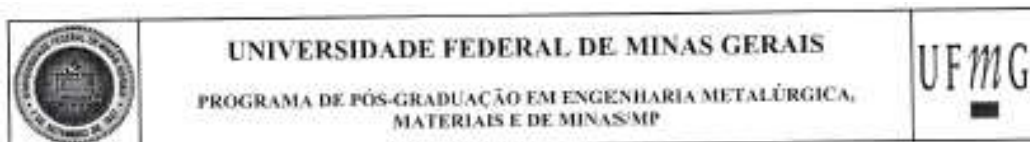
Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares.

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia

2019

R696a	<p>Rodrigues, Fabrício Domith. Avaliação da técnica de duplo maçarico para ajuste do dimensionamento de placas de aço [recurso eletrônico] / Fabrício Domith Rodrigues. – 2019. 1 recurso online (x, 51 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Roberto Parreiras Tavares.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 50-51. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Metalurgia extrativa - Teses. 3. Placas (Engenharia) - Teses. 4. Metais - Corte - Teses. 5. Desenho (Engenharia) Dimensionamento - Teses. I. Tavares, Roberto Parreiras. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 669(043)</p>
-------	---

ATA DE DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO



ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO **FABRÍCIO DOMITH RODRIGUES**

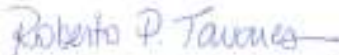
Realizou-se, no dia 19 de novembro de 2019, às 13:30 horas, 2240, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de dissertação, intitulada *AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE DUPLO MAÇARICO PARA AJUSTE DO DIMENSIONAMENTO DE PLACAS DE AÇO.*, apresentada por FABRÍCIO DOMITH RODRIGUES, número de registro 2017721047, graduado no curso de ENGENHARIA METALÚRGICA, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a), Roberto Parreiras Tavares - Orientador (UFMG), Prof(a), Hormando Leocadio Junior (Usiminas), Prof(a), Sérgio Luiz de Souza Costa (Solvi Insumos).

A Comissão considerou a dissertação:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.
Belo Horizonte, 19 de novembro de 2019.



Prof(a), Roberto Parreiras Tavares (Doutor)



Prof(a), Hormando Leocadio Junior (Doutor)



Prof(a), Sérgio Luiz de Souza Costa (Doutor)

RESUMO

Em laminadores cuja tecnologia de laminação vertical é inexistente ou limitada, eventualmente é necessário ajustar a largura das placas via processo de oxicorte. Contudo, o processo de corte convencional a frio não é recomendado para algumas qualidades de aço por gerar susceptibilidades às trincas na seção de corte. Para contornar a ocorrência de trincas no corte convencional foi desenvolvida e aplicada na Usiminas uma nova técnica de oxicorte em placas com base na utilização de duplo maçarico. Após otimização dos parâmetros de velocidade e posição dos maçaricos foi possível obter temperaturas da ordem de 200°C homogeneamente distribuídas ao longo da seção de corte principal, favorecendo o ajuste dimensional sem trincas. Com a implementação industrial, verificou-se índices superiores a 85% de aprovação de placas e, conseqüentemente, o aproveitamento de placas que anteriormente não eram destinadas a geração de produtos laminados. Palavra-chave: Oxicorte, duplo maçarico e Placas.

ABSTRACT

On Rolling Mills whose vertical rolling technology is non-existent or limited, eventually is necessary to adjust the width of the slabs by flame cutting process. However, the conventional flame cutting process is not recommended for some grades of steels due to generation of susceptibility to cracks in the cutting section. Thus, in the present work, a new technique for dimensional adjustment of slabs based on the use of double flame cut was developed and applied at Usiminas. After optimization of cutting parameters (velocity and position of the torches), temperatures of 200°C were obtained, homogeneously distributed along the cutting section, favoring dimensional adjustment. With the industrial implementation, there were indexes above 85% of slabs approval and, consequently, the use of plates that were not previously intended for the generation of rolling mill products. Keywords: Flame cutting, double torches and Slabs

SUMÁRIO

ATA DE DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XII
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	2
2.1 Geral.....	2
2.2 Específicos	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Oxicorte	4
3.2 Histórico do Oxicorte	4
3.3 Processo de Oxicorte do Ferro	5
3.4 Gases Combustíveis Usados em Oxicorte	7
3.4.1 Gás combustível utilizado no processo de oxicorte da Usiminas Ipatinga	9
3.4.2 Bicos de Corte.....	10
3.4.3 Material a Ser Cortado	11
3.5 Parâmetros no processo de oxicorte	13
3.5.1 Pureza do Oxigênio	13
3.5.2 Pressão e Vazão dos Gases.....	13
3.5.3 Velocidade de Avanço do Maçarico	14
3.6 O Processo de Oxicorte de Placas na Usiminas	15
3.7 Fluxo de calor no processo de oxicorte	18
3.7.1 Ciclagem térmica e seus efeitos.....	20
3.7.2 Preaquecimento.....	22

3.8	Técnicas de oxicorte para ajuste dimensional de placas e de chapas com pré-aquecimento.....	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1	Desenvolvimento do Método de Oxicorte Duplo	26
4.2	Definição do Equipamento	27
4.3	Experimentos.....	29
4.4	Metodologia para obtenção dos dados	30
4.5	Experimento Industrial Piloto.....	32
4.6	Laminação Experimental das Placas e Monitoramento dos Resultados	36
4.7	Treinamento do efetivo operacional na técnica do Oxicorte Duplo Maçarico e ensaio não destrutivo por Líquido Penetrante e Inspeção da placa após corte.....	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	Resultados	37
5.1.1	Curvas Térmicas	37
5.1.2	Gradientes Térmicos Gerados.....	42
5.1.3	Otimização dos Resultados.....	44
6	CONCLUSÕES.....	48
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Representação esquemática do processo de oxicorte (RAMALHO, 2008).	.6
Figura 3.2- Gráfico do percentual de O ₂ para dada temperatura de chama e para diferentes gases combustíveis (RAMALHO, 2008).	8
Figura 3.3 – Desenho esquemático de dois tipos de bico de corte (ANDRADE E HORTA, 1996).	10
Figura 3.4 – Diferentes vistas de cortes de três tipos de bicos de corte (RAMALHO, 2007).	11
Figura 3.5a - Efeito da correta velocidade de oxicorte no acabamento da face cortada por oxicorte (ESAB, 2019). A superfície está plana com as linhas do “kerf” paralelas e retas.	14
Figura 3.5b - Efeito da baixa velocidade de oxicorte no acabamento da face cortada por oxicorte (ESAB, 2019). A superfície apresenta aberturas ou sucos na parte inferior da peça cortada aliado a presença de escória na peça.	14
Figura 3.5c - Efeito da alta velocidade de oxicorte no acabamento da face cortada por oxicorte (ESAB, 2019). A superfície de corte apresenta-se encurvada com as linhas do “kerf” em forma de curvas e paralelas, além da presença de escória na peça.	14
Figura 3.6– Foto da face relacionada à espessura da placa indicando o defeito causado por corte irregular.	17
Figura 3.7– Foto de trinca longitudinal ao comprimento da placa no centro da espessura na seção de corte.	18
Figura 3.8 - Foto de trinca transversal ao comprimento da placa na seção de corte.	18
Figura 3.9 - Exemplo de um mapa térmico espacial de um processo de oxicorte (RAMALHO, 2007).	19
Figura 3.10 - Ciclo Térmico e Repartição Térmica (RAMALHO, 2008).	20
Figura 3.11 - Gradiente térmico de uma peça aquecida causado por um aquecimento localizado, sendo exemplificados por dois extremos de temperatura com as cores vermelho e azul. (RAMALHO 2008).	21

Figura 3.12 - Desenho representativo de técnica de oxicorte no enquadramento de placas de aço sensíveis a trincas após oxicorte (HIROFUMI, 2005)	23
Figura 3.13 - Desenho adaptado da técnica de oxicorte no enquadramento de chapas grossas de aço sensíveis a trincas atrasadas após oxicorte (KENSABURO, 1989)	24
Figura 4.1 - Síntese das etapas para desenvolvimento das atividades.	25
Figura 4.2 - Desenho esquemático da operação no oxicorte utilizando a técnica duplo maçarico.....	26
Figura 4.3 - Sistema de oxicorte via duplo maçarico: (1) máquina de oxicorte portátil, (2) suporte para posicionamento dos maçaricos, (3) maçarico de corte principal e (4) maçarico de corte secundário ou de pré-aquecimento.....	28
Figura 4.4 – Foto interna Usiminas Ipatinga do suporte para maçaricos e máquina de oxicorte portátil.	28
Figura 4.5 – Foto ilustrativa da caneta de oxicorte mecanizado utilizada nos testes da metodologia do oxicorte por duplo maçarico.	29
Figura 4.6 – Bico de oxicorte série 1503#2 utilizado nos testes da metodologia do oxicorte por duplo maçarico.	29
Figura 4.7 – Croqui do posicionamento dos termopares na placa de 250 mm de espessura para avaliação da temperatura durante oxicorte.	30
Figura 4.8 – Foto da montagem experimental ilustrando a implantação dos termopares tipo K com bainha de 6 mm, isolados do par termoelétrico em óxido de magnésio (MgO) com grau de pureza de 99,4% e capa protetora de INCONEL 600 na superfície da placa.	30
Figura 4.9 – Profundidade dos pontos medição e posicionamento dos termopares ao longo da espessura da placa. Dimensões em mm.	31
Figura 4.10 – Distância dos termopares à seção de corte secundário ao longo do comprimento da placa.....	31
Figura 4.11 - Microcomputador portátil com sistema de aquisição de dados do fabricante Grafhtec, modelo midi logger GL 240.....	32
Figura 4.12 – Foto ilustrativa da raspagem via espátula na seção cortada.....	33

Figura 4.13- Foto ilustrativa da escovação na seção cortada.....	33
Figura 4.14 - Foto ilustrativa da aplicação do líquido penetrante na seção de corte.	34
Figura 4.15 – Foto ilustrativa da remoção do líquido penetrante aquoso lavável.	34
Figura 4.16 – Foto ilustrativa da aplicação do líquido revelador.....	35
Figura 4.17 – Foto da inspeção visual de placas após aplicação do líquido revelador. ..	35
Figura 5.1a – Gráfico de relatório interno Usiminas do perfil térmico com o posicionamento dos termopares no centro da espessura da placa em posição relativa de 25 e 50 mm da superfície de oxicorte e velocidade de avanço de oxicorte de 180 mm/min. Aumentar a fonte das escalas e ampliar a figura na vertical.....	37
Figura 5.1b – Gráfico de relatório interno Usiminas do perfil térmico com o posicionamento dos termopares a 1/4 da espessura da placa em posições relativas de 25 e 50 mm da superfície de oxicorte e velocidade de avanço de oxicorte de 180 mm/min. Aumentar a fonte das escalas e ampliar a figura na vertical.....	38
Figura 5.2a – Gráfico de relatório interno Usiminas do perfil térmico com o posicionamento dos termopares no centro da espessura da placa em posições relativas de 25 e 50 mm da superfície de oxicorte e velocidade de avanço de oxicorte de 90 mm/min. Aumentar a fonte das escalas e ampliar a figura na vertical.....	39
Figura 5.2b – Gráfico de relatório interno Usiminas do perfil térmico com o posicionamento dos termopares a 1/4 da espessura da placa em posições relativas de 25 e 50 mm da superfície de oxicorte e velocidade de avanço de oxicorte de 90 mm/min.. Aumentar a fonte das escalas e ampliar a figura na vertical.....	39
Figura 5.3a – Gráfico de relatório interno Usiminas da diferença das temperaturas máximas obtidas nas posições dos termopares a 1/2 e 1/4 da espessura da placa cortada via velocidades de avanço de oxicorte a 180 e 90 mm/min, posição dos termopares a 25 mm da superfície de corte.....	43
Figura 5.3b – Gráfico de relatório interno Usiminas da diferença das temperaturas máximas obtidas nas posições dos termopares a 1/2 e 1/4 da espessura da placa cortada via velocidades de avanço de oxicorte a 180 e 90 mm/min, posição dos termopares a 50 mm da superfície de corte.....	43

Figura 5.4 – Gráfico de relatório interno Usiminas da diferença das temperaturas máximas obtidas nas posições dos termopares a meio, a $\frac{1}{4}$ e a $\frac{3}{4}$ da espessura da placa cortada via velocidades de avanço de oxicorte de 90 mm/min, posição dos termopares a 50 mm da superfície de corte. Aumentar a fonte das escalas e ampliar a figura na vertical.	46
Figura 5.5. Índice de aprovação de placas após utilização da técnica do oxicorte por duplo maçarico entre os meses de Janeiro 2019 a Maio 2019.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 - Composição típica do gás natural utilizado pela Usiminas Ipatinga	9
Tabela III.2 – Características físicas e químicas do gás natural utilizado na Usiminas Ipatinga.	9
Tabela III.3 - Efeitos dos elementos de liga sobre a operação de corte (MARQUES et al., 2011).	12
Tabela III.4 – Tabela adaptada da patente Method of Cutting Steel (HIROFUME 2003) com o significado dos números da figura 3.12	23
Tabela III.5 – Tabela adaptada de KENSABURO (1989) com o significado das letras da figura 3.13.....	24
Tabela V.1 – Temperaturas máximas obtidas em testes variando a velocidade de avanço de oxicorte.....	42
Tabela V.2 – Tempos para atingir a temperatura máxima obtidas em testes variando a velocidade de avanço de oxicorte	45

1 INTRODUÇÃO

No processo de lingotamento contínuo, eventualmente é necessário variar a largura gerando placas com forma trapezoidal. Após lingotamento, por necessidades de programação ou por aproveitamento de placas a novos clientes, o enquadramento ou ajuste dimensional se faz necessário. O ajuste dimensional na placa é realizado por corte a gás (gases: oxigênio e gás natural) utilizando maçarico acoplado a equipamento móvel denominado “tartaruga” ou máquina de corte portátil. O corte é normalmente realizado utilizando um maçarico com vazão/pressão de gás e velocidade de corte fixo.

Entretanto, para algumas qualidades de aço, com carbono equivalente acima de 0,30%, e a presença em liga de elementos como o nióbio e vanádio o corte a gás pode implicar na ocorrência de trincas laterais localizadas na seção cortada, desqualificando a placa e, conseqüentemente, inviabilizando o seu processamento posterior de laminação a quente.

Para aços ligados ao nióbio e ou ao vanádio durante o processo de oxicorte, pode-se iniciar a nucleação de nitretos e carbonitretos em contornos de grão à temperaturas da ordem de 750 à 900°C, promovendo a fragilização à quente do material. Esse efeito de fragilização associado a variações de temperatura na placa e conseqüentemente à indução de tensões termomecânicas durante ou após o processo de oxicorte podem induzir a trincas superficiais na seção cortada, desabilitando a placa ao enquadramento dimensional via processo de oxicorte.

Assim, estas placas são normalmente desviadas e destinadas a aplicações menos nobres, tais como produto não laminado ou sucata para retorno ao convertedor, por exemplo.

O uso de dois maçaricos para corte de placas tem o propósito de realizar um pré-corte com o intuito de fornecer um aporte térmico inicial, funcionando como um pré-aquecimento localizado, haja vista que as placas são cortadas a frio e a realização de aquecimento lento em fornos é inviável economicamente.

A ideia de realizar um pré-corte com uma defasagem em relação ao corte principal é uma tentativa de contornar a necessidade de um aquecimento lento. Entretanto, para que

o processo seja viável tecnicamente é necessário que o pré-corte forneça aporte térmico suficiente sem que as características da superfície de corte sejam afetadas.

Em linhas gerais, práticas operacionais têm mostrado que o oxicorte via duplo maçarico tem a possibilidade de reduzir a ocorrência de desclassificação de placas por trincas. Entretanto, a prática operacional não se encontra ajustada e os limites para sua aplicação, em relação à composição química dos aços, bem definidos. Assim, avanços no conhecimento são necessários para definição da abrangência da técnica.

Este trabalho busca o desenvolvimento de uma nova técnica de oxicorte de placas, duplo maçarico, com o dimensionamento e definição do equipamento sendo feito por medições e análise térmica via termopares implantados previamente no interior de placas de aço.

A partir da realização de experimentos piloto, com variação dos fatores do oxicorte como velocidade de avanço de corte, posicionamento dos bicos e inspeção visual das seções cortadas após ensaio não destrutivo por líquido penetrante aquoso, foi indicado o melhor posicionamento dos bicos de oxicorte. Desta forma essa nova técnica pode entregar melhores condições no aporte térmico localizado e na homogeneidade térmica da seção de oxicorte em relação à técnica de corte convencional de placas.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Implementar metodologia de oxicorte com duplo maçarico para reduzir o número de trincas ou minimizar seu tamanho, sua intensidade por área quadrada ou direção após processo de corte a gás em placas de aço com carbono inferior a 0,13%, teor de manganês maior do que 1,0% e nióbio + vanádio acima de 0,030%.

2.2 Específicos

- Avaliar na literatura, técnicas diferentes de abordagens relacionadas ao oxicorte de placas de aço;

- Implementar, de forma piloto, técnica que iniba ou reduza a ocorrência de trincas nas seções cortadas em placas de aço microligados lingotadas pela Usiminas;
- Verificar o efeito do pré-aquecimento localizado via processo de oxicorte secundário ou de pré-aquecimento e seus efeitos térmicos na área da seção cortada. Desta forma, buscando relações entre a mitigação de trincas e encharque térmico na seção da placa cortada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Oxicorte

Este é o nome dado a um grupo de processos de corte de materiais e ligas, por reação química entre o oxigênio de alta pureza e o metal preaquecido em temperaturas elevadas ao seu ponto de ignição. A temperatura necessária é mantida por uma chama de gás combustível queimando em oxigênio.

No caso de metais resistentes à oxidação tal como ligas refratárias, aços ligados e ferros fundidos, a reação é auxiliada pela adição de um fluxo de pó metálico, agente químico ou abrasivo ou ainda a mistura deles.

A reação é fortemente exotérmica e o calor despreendido aquece as zonas vizinhas, favorecendo o corte progressivo. Todavia, é necessário durante o corte manter uma fonte de calor para que o metal permaneça em sua fase líquida, sendo a intensidade proporcional à espessura que se deseja cortar.

Somente os aços ao carbono com menos de 0,5% e que não contenham teores elevados de outros elementos de liga, tais como: cromo, níquel, manganês ou silício “queimam” no oxigênio.

3.2 Histórico do Oxicorte

O elemento oxigênio foi descoberto na Suécia pelo farmacêutico Carl Wilhelm Scheel em 1771. O nome de oxigênio foi dado por Lavoisier, em 1774, que significa em grego ‘aquele que gera ácido’ (RAMALHO, 2008).

A primeira patente para utilização do O_2 para corte de materiais data de 1888. Foi solicitada por Tomas Fletcher em um trabalho enviado para a Sociedade da Indústria Química de Liverpool.

Em 1901, foi solicitada uma nova patente na Alemanha por Herman Menne, que aplicava o corte com lança de O_2 . Nesta época, problemas com a segurança do processo fizeram com que sua utilização fosse proibida por lei, porém em 1906 o corte com lança de O_2 já era empregado nos EUA por Hans Mueller. Este corte, uma variação do

oxicorte, é um processo ainda em uso atualmente. Ele consiste de um aquecimento inicial, seguido da alimentação de O_2 através de um tubo consumível.

Em 1905, Jottrand apresentou sua patente para um maçarico de corte. Anos depois, apareceram os primeiros maçaricos com bicos de corte contendo orifício central para o jato de O_2 , forma esta que é a utilizada até hoje.

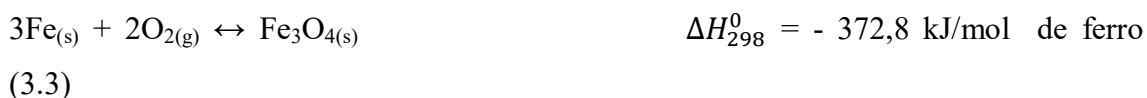
3.3 Processo de Oxicorte do Ferro

Na temperatura ambiente e na presença de O_2 , o ferro se oxida lentamente. À medida que se eleva a temperatura, essa oxidação se acelera tendo sua temperatura de ignição à 870°C e tornando-se praticamente instantânea a 1350°C . Nesta temperatura, 1350°C , citada como oxidação viva, o calor fornecido pela reação é suficiente para liquefazer os óxidos formados e realimentar a reação. O óxido no estado líquido escoar, expulso pelo jato de O_2 , permitindo o contato do ferro devidamente aquecido com O_2 puro, o que garante a continuidade ao processo.

As condições básicas para ocorrência do oxicorte são:

- A temperatura de início de oxidação viva deve ser inferior à temperatura liquidus do metal;
- A reação deve ser suficientemente exotérmica para manter a peça na temperatura de início de oxidação viva;
- Os óxidos formados devem ser líquidos na temperatura de oxicorte, facilitando seu escoamento para possibilitar a continuidade do processo;
- O material a ser cortado deve ter baixa condutividade térmica;
- Os óxidos formados devem ter alta fluidez.

Segundo RAMALHO (2008), as reações químicas do ferro com o oxigênio podem ser descritas nas equações de (3.1) a (3.3):



Na figura 3.1 é apresentado um desenho esquemático do processo de oxicorte.

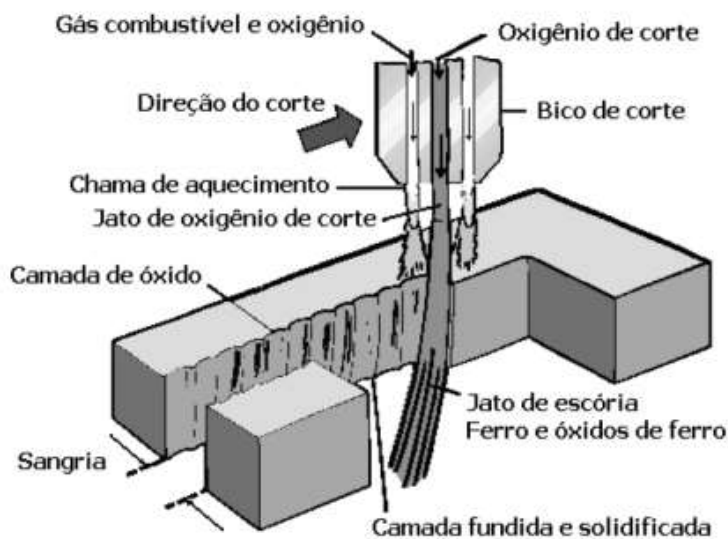


Figura 3.1 - Representação esquemática do processo de oxicorte (RAMALHO, 2008).

A mistura do gás combustível e oxigênio forma uma chama de aquecimento. Para que os gases possam ser conduzidos e direcionados até a peça se usa o bico de corte, responsável pela saída dos gases de maneira constante e sem turbulência.

Para a realização do corte, o metal de base deve ser aquecido, e, ao atingir a temperatura de ignição, a válvula do oxigênio de corte é aberta, incidindo o O_2 sobre o metal já aquecido.

Desta forma a reação conhecida como oxidação se inicia rapidamente, o calor liberado pela oxidação do ferro ou aço, funde o óxido de ferro formado pela reação química, acelerando o pré-aquecimento da peça cortada. A camada fundida, “sangria”, escapa como jato de escória, ferro e óxido de ferro, expondo desta forma mais ferro ou aço ao jato de oxigênio de corte.

No oxicorte somente a porção da camada solidificada que está no caminho do jato de oxigênio é oxidada. Desta forma, com o avanço do corte, tem-se a formação do “Kerf”, linha em formatos de traço de serra.

Dependendo da espessura que se tem interesse em cortar, o avanço de corte, o bico de corte e a pressão dos gases são regulados. Assim, esses parâmetros são importantes para o controle do processo, assim como o tipo de bico “*designer*” e o tipo de material a ser cortado.

3.4 Gases Combustíveis Usados em Oxicorte

São vários os gases combustíveis que podem ser usados para gerar a chama de ignição e a chama de preaquecimento. Entre eles podem ser citados: o acetileno, o propano, o gás liquefeito de petróleo (GLP), o gás natural, o gás de nafta e o hidrogênio gasoso.

O acetileno é o gás mais usado nos processos de oxicorte, graças à alta temperatura de chama ($3100^{\circ}C$). Este gás se torna particularmente importante quando o tempo de partida, ou seja, início do corte a gás é fração importante do tempo total da operação, como são os cortes curtos de canais e massalotes de fundição e sucata irregular.

O gás propano e o GLP são usados em virtude do relativo baixo custo por quantidade de energia térmica contida. Eles exigem, no entanto, maior volume de O_2 para ajuste da sua temperatura de chama.

O hidrogênio ainda é usado em corte subaquático, graças à facilidade de utilizá-lo em pressões que vençam a pressão hidrostática nas grandes profundidades, apesar de apresentar baixo poder calorífico volumétrico.

O gás natural e o gás de nafta apresentam crescente disponibilidade para as áreas industriais e, conseqüentemente, têm aumentado sua demanda para o processo de oxicorte. São utilizados com estes gases, em geral, os mesmos bicos de corte usados para o propano e o GLP, tanto o gás natural quanto o gás de nafta exigem de 1,7 a 2 volumes de oxigênio/volume de combustível, em relação ao acetileno.

A natureza do gás combustível influi na temperatura da chama, no consumo de O_2 e, conseqüentemente, no custo final do processo. Na figura 3.2 é mostrado o efeito dos gases de corte e do teor de oxigênio para obtenção da temperatura de chama máxima.

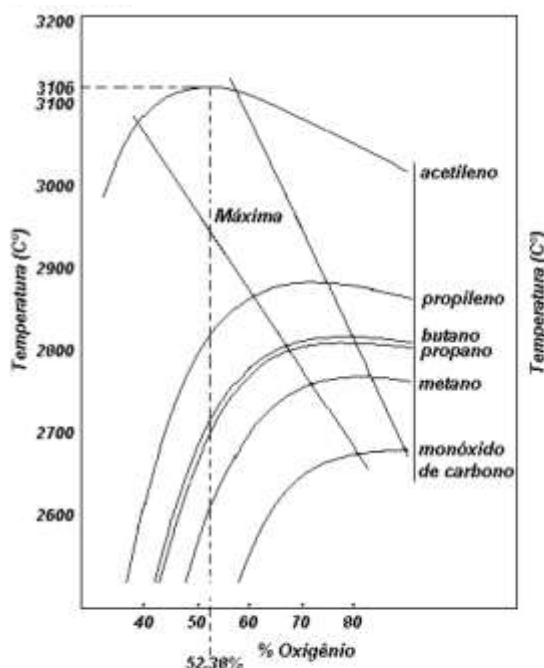


Figura 3.2- Gráfico do percentual de O_2 para dada temperatura de chama e para diferentes gases combustíveis (RAMALHO, 2008).

Conforme visto na figura 3.2, para cada tipo de gás se necessita de uma quantidade de oxigênio especificada para se atingir o máximo da temperatura de chama.

3.4.1 Gás combustível utilizado no processo de oxicorte da Usiminas Ipatinga

Por questões financeiras, acessibilidade e possuir características satisfatórias, o gás combustível utilizado no processo de oxicorte de placas é o gás natural. O gás natural é formado por uma cadeia de hidrocarbonetos, compostos químicos constituídos basicamente por átomos de carbono e hidrogênio, podendo variar sua composição dependendo de sua fonte. O componente principal do gás natural é o metano (CH₄). No restante de sua composição há pequenas parcelas de etano, propano e outros hidrocarbonetos de maior peso molecular, conforme ilustrado na tabela III.1.

Tabela III.1 - Composição típica do gás natural utilizado pela Usiminas Ipatinga

Composto	Porcentagem
Metano	88,5%
Etano	6,2%
Propano	2,2%
C4+	0,8%
CO ₂	1,8%
N ₂	0,5%

FONTE: GASMIG, 14 de maio 2018.

O gás natural apresenta como produtos da combustão, vapor d'água, dióxido de carbono, óxidos de enxofre e fuligem. As características do gás combustível utilizado no processo em estudo são encontradas na tabela III.2.

Tabela III.2 – Características físicas e químicas do gás natural utilizado na Usiminas Ipatinga.

Características Físicas e Químicas	
Poder Calorífico Superior	8.362 a 10.273kcal/m ³ 1atm a 20°C
Limite de Inflamabilidade	5-15% em volume (no ar)
Temperatura de autoignição	Entre 482 e 632°C
Velocidade de chama	35 a 50 cm/s
Temperatura de chama	1945°C com ar e 2810°C com oxigênio
Ponto de ebulição	-162°C
Ponto de fulgor	-187,8°C
Densidade	0,65 a 0,80kg/Nm ³

FONTE: GASMIG, 14 de maio 2018.

3.4.2 Bicos de Corte

O bico de corte é uma escolha importante para o processo de oxicorte. O bico conduz tanto os gases de pré-aquecimento quanto o oxigênio. Deste modo, ele tem como função misturar o oxigênio com o gás combustível, produzindo a chama de ignição e forçar o contato do oxigênio com o metal pré-aquecido. Normalmente, os gases de aquecimento são distribuídos ao longo da extremidade inferior do bico de forma anelar e o oxigênio é conduzido por um duto central.

De acordo com o tipo de gás combustível, o bico tem um formato construtivo diferente aproveitando melhor o calor da chama primária que o calor da chama secundária. Entre suas dimensões e formatos, o diâmetro interno ou canal de oxigênio tem maior relevância, pois por esse orifício se equilibram as pressões dos gases e, conseqüentemente, a vazão de O_2 , sendo dessa forma, determinante para os limites de espessuras a serem cortadas. Nas figuras 3.3 e 3.4 são apresentados desenhos esquemáticos de tipos de bicos, que podem ser fabricados em peça única ou em duas partes.

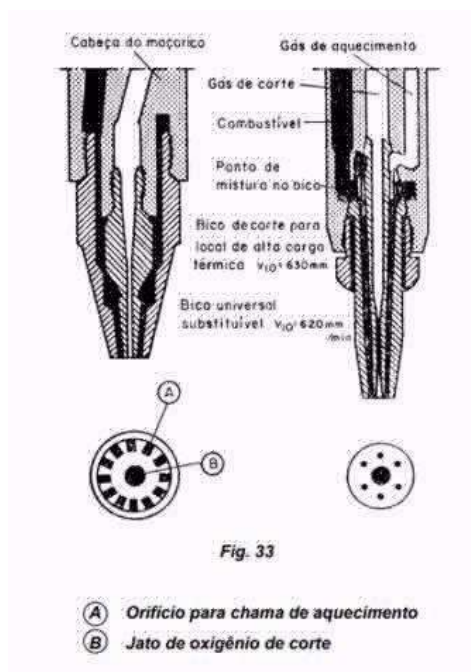


Figura 3.3 – Desenho esquemático de dois tipos de bico de corte (ANDRADE E HORTA, 1996).

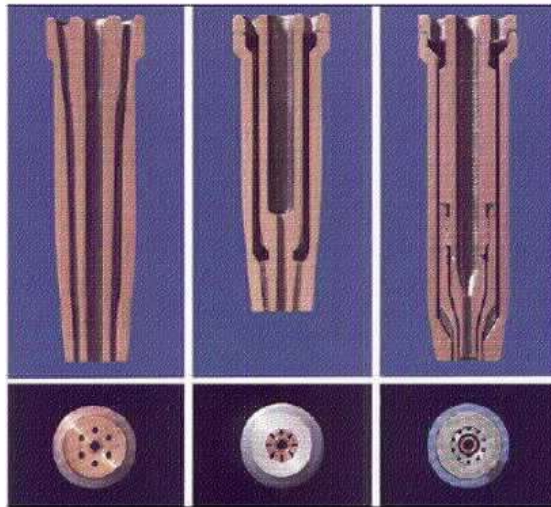


Figura 3.4 – Diferentes vistas de cortes de três tipos de bicos de corte (RAMALHO, 2007).

3.4.3 Material a Ser Cortado

O processo de oxicorte é indicado para ligas ferrosas com teores inferiores a 0,25% de carbono e que não contenham teores elevados de outros metais como cromo, níquel, manganês, cobre, alumínio, enxofre, fósforo, vanádio. Nos aços ligados, alguns elementos microligantes podem induzir sobre a operação efeitos indesejáveis como indicado na tabela III.3.

Tabela III.3 - Efeitos dos elementos de liga sobre a operação de corte (MARQUES et al., 2011).

Elementos	Efeito
Carbono	Aços com teores até 0,25% de carbono podem ser cortados sem problemas. Acima disso passa a ser necessário o uso de pré-aquecimento para prevenir têmpera e fissuras do material. Grafita e cementita são prejudiciais, mas ferro fundido com até 4% de carbono podem ser cortados com o uso de técnicas especiais.
Manganês	Aços com aproximadamente 0,14% de manganês e 1,5% de carbono são difíceis de cortar e o uso de pré-aquecimento produz melhores resultados.
Cromo	Aços com até 5% de cromo são cortados sem muita dificuldade quando a superfície está limpa. Com teores mais altos, da ordem de 10%, exigem técnicas especiais. A superfície de corte será áspera se usado o corte oxiacetileno convencional.
Níquel	Aços com até 7% de níquel podem ser cortados sem maiores problemas. Oxycorte de excelente qualidade de aços inoxidáveis podem ser feitos com a utilização de pós e fluxos.
Tungstênio	As ligas usuais com até 14% de tungstênio podem ser cortadas facilmente, mas o corte é mais difícil quando o teor é mais alto.
Cobre	Em teores até 2%, não tem nenhum efeito.
Alumínio	Desde que presente com teores até 10%, seu efeito não é apreciável.
Fósforo	Nas quantidades normalmente toleradas nos aços, este elemento não tem qualquer efeito.
Enxofre	Pequenas quantidades comuns nos aços não têm efeito. Para teores mais elevados a velocidade de corte é reduzida e o dióxido de enxofre passa a ser notado.
Vanádio	Nas quantidades usuais em aços, este elemento mais facilita do que prejudica o corte.

Para o corte de aços inoxidáveis, ferro fundido e não ferrosos, o processo tradicional não é mais indicado, sendo necessário o uso de técnica especial como adição de pós e fluxos para facilitar a operação.

Para o oxicorte de aços temperáveis e devido à ação de tempera na superfície do corte, conforme mencionado na tabela III.3, às vezes, passa a ser necessário o uso de pré-aquecimento para prevenir fissuras no material.

A espessura da peça tem um papel importante no processo de oxicorte, sendo necessário controlar variáveis do processo como: tipo do bico de oxicorte para o processo, faixa de pressão de oxigênio utilizada no processo, faixa de pressão de gás combustível utilizada no processo e velocidade de corte.

3.5 Parâmetros no processo de oxicorte

Diversos parâmetros afetam a eficiência e a qualidade do processo de oxicorte. Estes parâmetros estão relacionados com a pureza e a qualidade dos gases, com as pressões dos gases e com os controles do processo.

3.5.1 Pureza do Oxigênio

A pureza do oxigênio é de fundamental importância para o bom funcionamento do processo, podendo a pureza do agente oxidante afetar aspectos termodinâmicos e cinéticos das reações envolvidas.

A pureza indicada para processos industriais é de valores superiores a 99,5%, sendo que valores inferiores são prejudiciais ao oxicorte ou mesmo o inviabilizam. É importante mencionar que após o jato de O_2 sair do bico de corte, iniciam-se processos de contaminação. O primeiro com o contato com o ar atmosférico e o segundo com gases resultantes das reações químicas inerentes ao processo, como exemplo a oxidação do carbono.

3.5.2 Pressão e Vazão dos Gases

Esta variável está intimamente ligada com a espessura do material a ser cortado, tipo de bico a ser utilizado, velocidade de avanço e gases combustíveis utilizados para o processo.

3.5.3 Velocidade de Avanço do Maçarico

A velocidade de avanço dos maçaricos é uma das variáveis mais importantes para a qualidade do oxicorte. A velocidade de corte ou deslocamento do maçarico é função do tipo e espessura do metal que está sendo cortado. Pela movimentação do maçarico, o operador pode controlar o ângulo do “Kerf” ou ângulo das estrias de corte, buscando a melhor relação entre a combustão do metal e a velocidade de avanço do maçarico. Segundo ESAB. (2019), a figura 3.5a, b e c mostram os efeitos da velocidade de avanço de oxicorte no acabamento final das faces cortadas.



Figura 3.5a - Efeito da correta velocidade de oxicorte no acabamento da face cortada por oxicorte (ESAB, 2019). A superfície está plana com as linhas do “kerf” paralelas e retas.



Figura 3.5b - Efeito da baixa velocidade de oxicorte no acabamento da face cortada por oxicorte (ESAB, 2019). A superfície apresenta aberturas ou sucos na parte inferior da peça cortada aliado a presença de escória na peça.



Figura 3.5c - Efeito da alta velocidade de oxicorte no acabamento da face cortada por oxicorte (ESAB, 2019). A superfície de corte apresenta-se encurvada com as linhas do “kerf” em forma de curvas e paralelas, além da presença de escória na peça.

O fator velocidade de corte no processo de oxicorte tem fundamental importância na boa forma e aspecto da seção cortada, podendo afetar sua qualidade, trazendo defeitos na borda superior, borda inferior, ondulações na seção cortada, curvatura nas linhas do “Kerf”, aberturas e sucos na parte inferior da seção do corte. Esses defeitos podem interagir com tensões termomecânicas geradas no oxicorte e se tornarem regiões concentradoras de tensões.

3.6 O Processo de Oxicorte de Placas na Usiminas

O processo de oxicorte via Gás Natural é utilizado pela Usiminas Ipatinga no enquadramento e ou subdivisão de placas de aço, que tem como destino o beneficiamento em linhas de laminados de tiras a quente ou laminados chapas grossas. Algumas placas também podem ser destinadas para vendas a terceiros, mas é a prática menos usual.

No ano de 2018 e primeiro semestre de 2019, cerca de 650.000 toneladas de placas destinadas ao laminador de tiras a quente foram enquadradas via oxicorte nas etapas de acondicionamento, sendo subdivididas e ou enquadradas nas dimensões de acordo com a solicitação do cliente.

Caso as placas sejam fabricadas em formato inapropriado, devido à variação da largura no lingotamento contínuo e posteriormente sejam comprometidos seus processamentos subsequentes, faz-se o acondicionamento da placa, enquadramento dimensional, via processo de oxicorte.

Parte do processo de oxicorte é feito via equipamento semi-automático, máquinas pantográficas e manuais como máquinas de corte portátil.

Devido à necessidade de se adequar a largura ou o comprimento de placas já estocadas à demanda de clientes e limitações do processo, faz-se o seu enquadramento via oxicorte.

Atualmente os principais motivos de corte em placas na Usiminas Ipatinga são os ajustes da largura, cortes por “AM” (ajuste de molde) e “XL” (excesso de largura da

placa) e os ajustes no comprimento, corte por subdivisão das placas destinadas às laminações.

Os cortes por ajustes de molde “AM” são executados para o enquadramento de placas em formato trapezoidal, que não podem ser laminadas a quente verticalmente. Essa forma trapezoidal da placa deve-se a variações de largura durante o lingotamento contínuo.

Os cortes por excesso de largura “XL” são executados para o enquadramento de placas com larguras superiores à largura programada para a laminação a quente vertical, sendo necessário enquadrar a placa para a largura desejada, atendendo às limitações do equipamento de laminação.

Apesar do uso do processo de oxicorte para ampliar a aplicação ou aproveitamento de placas no processo produtivo, ele tem suas limitações que acarretam defeitos e perdas. A ocorrência de corte irregular e/ou trincamento na seção de corte são exemplos de problemas que podem ser observados após o oxicorte.

O corte irregular gera marcas na seção de corte com aspectos de degrau, canaletas ou grandes saliências. Ele ocorre devido às alterações em fatores do processo de oxicorte, tais como: variações de pressão de oxigênio, composição química do aço, operação irregular, altura e posicionamento do bico de corte e projeções de óxidos fundidos para dentro do bico de corte. Ele ocorre também, quando, por algum motivo, o corte é interrompido e tem que recomeçar, causando uma marca na seção de corte. Na figura 3.6 é mostrada uma fotografia de aspecto do corte irregular na seção de placas.



Figura 3.6– Foto da face relacionada à espessura da placa indicando o defeito causado por corte irregular.

Trincas e fissuras nas seções cortadas podem ocorrer por diversos motivos. Estão normalmente relacionadas aos mecanismos de fragilização do aço, às transformações de fase ou gradientes de temperatura. O surgimento de trincas na seção cortada após oxicorte torna-se um grande problema para a integridade da placa nos processos subsequentes de laminação, podendo gerar rupturas dos produtos laminados.

Devido à elevada gama de aços com consideráveis concentrações de carbono, manganês e elementos de ligas, aliado a teores de hidrogênio inapropriados, regiões com elevado índice de descontinuidades (região de segregação) e a presença de tensões residuais nas placas, o surgimento de trincas na seção cortada após oxicorte torna-se um grande problema para a integridade das placas, conforme ilustrado na figura 3.7 e 3.8.



Figura 3.7– Foto de trinca longitudinal ao comprimento da placa no centro da espessura na seção de corte.



Figura 3.8 - Foto de trinca transversal ao comprimento da placa na seção de corte.

No caso do defeito apresentado na figura 3.6, um novo processamento deve ser realizado para amenizar os efeitos do corte irregular. Entretanto, não gera recusa de placas apenas retrabalho na mesma. No caso dos defeitos apresentados nas figuras 3.7 e 3.8 as placas são desqualificadas para a laminação subsequente. Neste caso, são direcionadas para venda ou para sucata.

3.7 Fluxo de calor no processo de oxicorte

O oxicorte é um processo exotérmico de seccionamento localizado de materiais metálicos por ação de um jato de oxigênio que atua sobre um ponto previamente aquecido por uma chama oxi-combustível. É largamente utilizado no seccionamento de ligas ferrosas em especial o aço.

Conforme KUO (1987) e GRONG (1996), quando se aquece localmente as seções cortadas, as regiões vizinhas ou adjacentes, que se submetem aos ciclos térmicos podem sofrer variações térmicas, variações dimensionais, alterações microestruturais, dissolução e difusão de precipitados, alterando desta forma as propriedades do material.

Ao se aquecer localmente um ponto específico no processo de oxicorte, as regiões vizinhas a esse ponto são aquecidas gradativamente por condução, difundindo dessa forma o calor na peça e, conseqüentemente, iniciando um gradiente térmico definido pela maior temperatura na região de oxicorte e temperatura ambiente. Para explicitar esse efeito, a figura 3.9 apresenta um mapa térmico espacial com as temperaturas máximas atingidas.

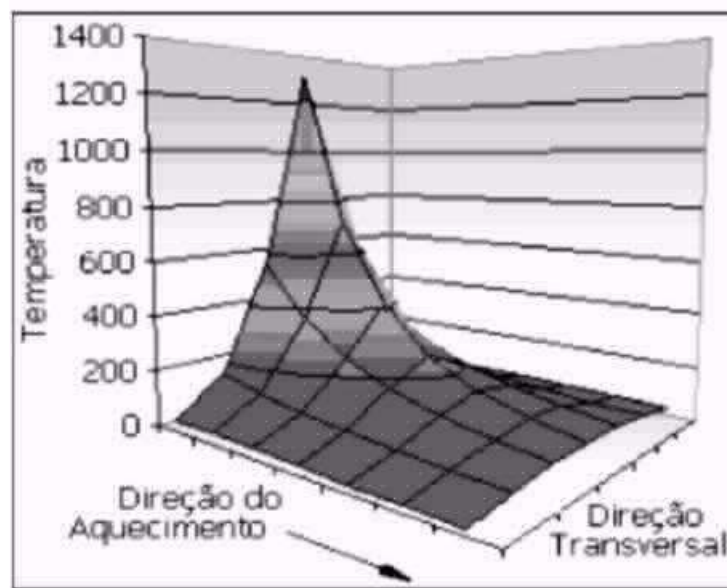


Figura 3.9 - Exemplo de um mapa térmico espacial de um processo de oxicorte (RAMALHO, 2007).

Conforme visto na figura 3.9, a temperatura máxima ocorre na região de contato com a reação de corte. A variação de temperatura é grande e afeta as regiões adjacentes formando uma superfície cônica. Na região de corte, as temperaturas podem atingir temperaturas muito elevadas, que tendem a austenitizar o material. Nas regiões adjacentes as temperaturas são muito baixas, o que leva a um elevado gradiente térmico em relação à posição do corte.

A maneira como os gradientes de temperatura se distribuem ao longo das dimensões da peça cortada é importante para controle de falhas e até mesmo viabilizar o uso do oxicorte. No caso de placas, que possuem espessuras relativamente elevadas, da ordem de 250 mm, a distribuição das temperaturas ao longo da espessura também é importante.

3.7.1 Ciclagem térmica e seus efeitos

O processo de oxicorte é caracterizado por aquecimento localizado em uma determinada peça, permanecendo o restante desta em temperaturas muito inferiores. Para cada ponto da peça é então traçada uma curva tempo x temperatura, e cada uma destas curvas é denominada ciclo térmico. Os ciclos térmicos podem ser obtidos na prática pela medida direta de termopares inseridos na peça e acoplados a registradores ou então calculados teoricamente baseando-se na teoria do fluxo de calor, sendo este o trabalho tratado por ROSENTHAL (1941). Quando vários ciclos térmicos são agrupados em um único gráfico, obtém-se uma repartição térmica, que é formada pela reta traçada entre os pontos de máxima temperatura das curvas dos ciclos térmicos.

A figura 3.10 ilustra ciclos e repartições térmicas para os pontos de aquecimento figura 3.11.

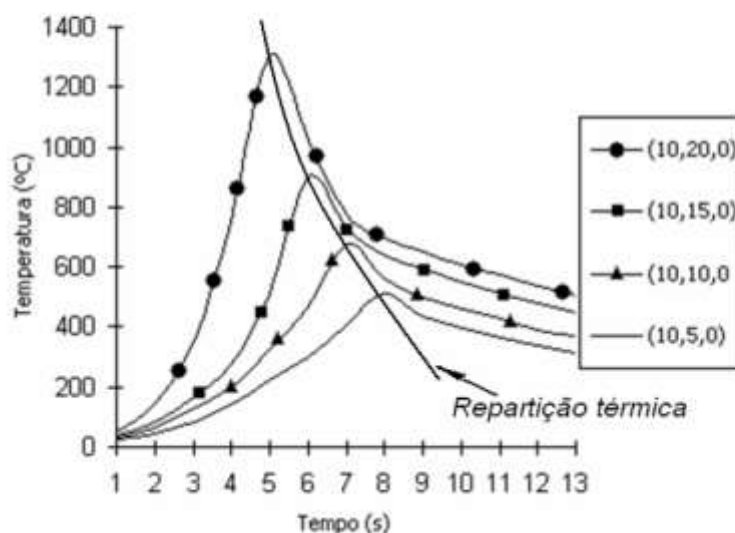


Figura 3.10 - Ciclo Térmico e Repartição Térmica (RAMALHO, 2008)

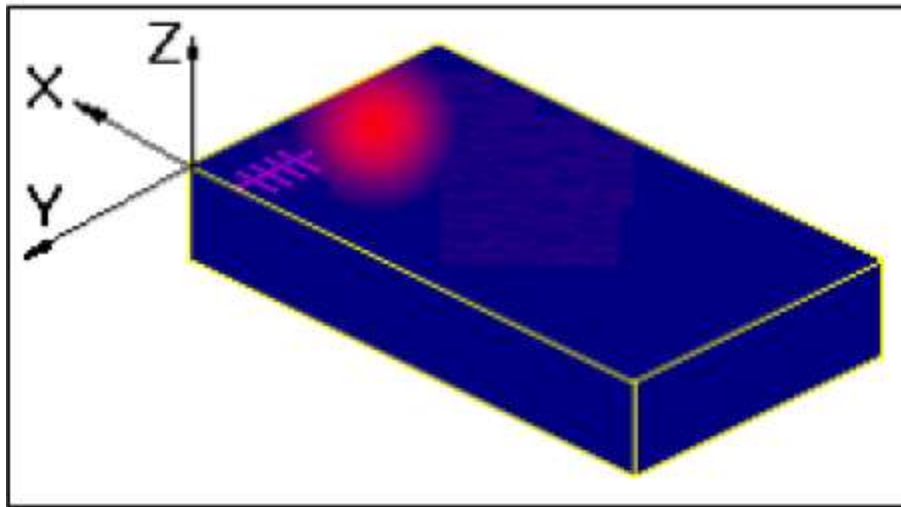


Figura 3.11 - Gradiente térmico de uma peça aquecida causado por um aquecimento localizado, sendo exemplificados por dois extremos de temperatura com as cores vermelho e azul. (RAMALHO 2008)

As regiões aquecidas tendem a se dilatar, mas essa dilatação é restringida pelas partes adjacentes submetidas a temperaturas menores, o que resulta no desenvolvimento de deformações elásticas e plásticas concentradas nas regiões aquecidas. Devido à deformação plástica localizada, ao final do processo, tensões internas (tensões residuais) permanecem próximas da seção cortada, apresentando mudanças permanentes de forma e dimensão.

As tensões residuais são aquelas que permanecem na peça quando todas as suas solicitações externas são removidas. Essas tensões aparecem frequentemente em peças submetidas a diferentes processamentos térmicos, como exemplo em peças processadas no oxicorte.

As mudanças de volume associadas com transformação de fases do material podem ser também, responsáveis pelo aparecimento de tensões residuais e distorções.

O aparecimento das tensões residuais pode dar origem a outros efeitos indesejáveis na região termicamente afetada e associados a falhas estruturais, pode também induzir problemas de trincas, corrosão sob tensão, trincas por fadiga e flambagem.

3.7.2 Preaquecimento

O preaquecimento envolve o aquecimento do metal base, seja na sua totalidade ou em apenas regiões localizadas, até uma temperatura específica desejada, chamada assim de temperatura de preaquecimento. Seu papel é influenciar o comportamento do resfriamento de modo a tornar as taxas de resfriamento mais lentas e, conseqüentemente, reduzindo dessa forma o aparecimento de trincas a frio. Outro fator importante do pré-aquecimento seria a indução a difusão do hidrogênio, que possa estar presente na estrutura do metal de base.

Atualmente a técnica do preaquecimento é bastante difundida em processos de soldagem, sendo seus efeitos citados por FUNDERBURK (1997):

- Diminui a taxa de resfriamento no metal de solda e no metal base, produzindo uma estrutura metalúrgica mais dúctil, com maior resistência a trincas;
- A taxa de resfriamento mais lenta fornece uma oportunidade para o hidrogênio que pode estar presente para se difundir sem causar danos, reduzindo o potencial de trincas;
- Reduz as tensões de contração na solda e no metal base adjacente.

3.8 Técnicas de oxicorte para ajuste dimensional de placas e de chapas com pré-aquecimento

Os efeitos do pré-aquecimento são bastante estudados e as técnicas são bem difundidas em se tratando do processo de soldagem. De fato, a etapa de pré-aquecimento traz benefícios ao processo de oxicorte de forma semelhante. Entretanto, a realização desta etapa no processo industrial de maneira barata e rápida é um desafio.

Neste sentido, buscando pré-aquecer e homogeneizar termicamente a seção cortada e conseqüentemente reduzir a ocorrência de trincas em aços susceptíveis a fissuras, HIROFUMI (2005) desenvolveu técnica para ajuste dimensional utilizando sistema de dois maçaricos ou duplo maçarico. Sua técnica foi direcionada ao ajuste dimensional por oxicorte de placas de aço com espessura superior a 170mm, microligadas ao

Carbono, Manganês, Nióbio e Vanádio com relação percentual mássica de $C + Mn/6 \geq 0,3\%$ ou $Nb + V \geq 0,02\%$. A figura 3.12 apresenta um desenho esquemático do aparato desenvolvido por este autor. O significado dos números é apresentado na Tabela III.4.

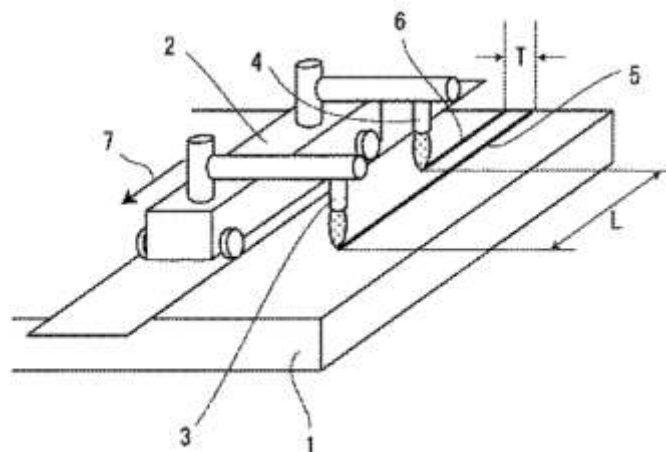


Figura 3.32 - Desenho representativo de técnica de oxicorte no enquadramento de placas de aço sensíveis a trincas após oxicorte (HIROFUMI, 2005)

Tabela III.4 – Tabela adaptada da patente Method of Cutting Steel (HIROFUME 2003) com o significado dos números da figura 3.12

Identificação	Significado
1	Aço
2	Máquina de corte portátil
3	Maçarico precedente de corte
4	Maçarico de corte
5	Linha de corte do maçarico precedente
6	Linha de corte
7	Direção de movimentação
L	Distância entre o maçarico precedente e maçarico de corte
T	Distância entre a linha de corte e a linha de corte do maçarico precedente

Essa técnica consiste em espaçar a linha do oxicorte entre os maçaricos em distâncias \leq a 30 mm e defasar os bicos em torno de 300 mm.

Outra técnica com pré-aquecimento localizado e ajuste dimensional com oxicorte foi desenvolvida por KENSABURO et al. (1989), tendo como intuito a prevenção de trincas retardadas na seção cortada via oxicorte em produtos Laminados Chapas Grossas. Esta técnica é ilustrada na Figura 3.13 e Tabela III.5.

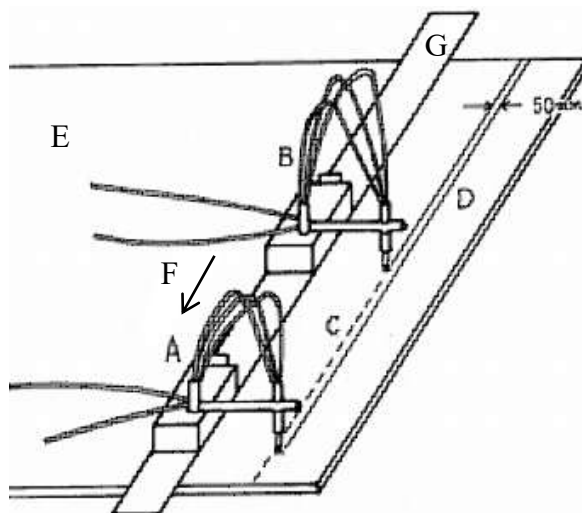


Figura 3.13 - Desenho adaptado da técnica de oxicorte no enquadramento de chapas grossas de aços sensíveis a trincas atrasadas após oxicorte (KENSABURO, 1989)

Tabela III.5 – Tabela adaptada de KENSABURO (1989) com o significado das letras da figura 3.13

Identificação	Significado
A	Máquina de Oxicorte Portátil para Pré Aquecimento
B	Máquina de Oxicorte Portátil para Acabamento do Corte
C	Linha de Oxicorte para Acabamento
D	Linha de Oxicorte para Pré Acabamento
50 mm	Distância entre as Linhas de Oxicorte C e D
E	Chapa Grossa de Aço
F	Sentido de Corte
G	Trilho da Máquina de Oxicorte Portátil

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho visa desenvolver método de oxicorte com duplo maçarico, para reduzir a ocorrência de trincas na borda em seções de placas após o ajuste dimensional. Tendo em vista que as trincas não ocorrem em todo tipo de aço e devido ao elevado número de qualidades produzidas na Usiminas, o escopo do presente trabalho abrangeu apenas aços com teor de carbono inferior a 0,13%, teor de manganês maior do que 1,0% e Nióbio + Vanádio acima de 0,03%.

Em linhas gerais, o presente trabalho foi dividido em três etapas:

- Desenvolvimento do sistema de oxicorte com duplo maçarico;
- Determinação da posição dos bicos dos maçaricos, definição das condições de corte e experimentos industriais;
- Implantação da metodologia desenvolvida em ambiente industrial.

O fluxograma, apresentado na figura 4.1, esquematiza as etapas propostas para o desenvolvimento do presente trabalho.

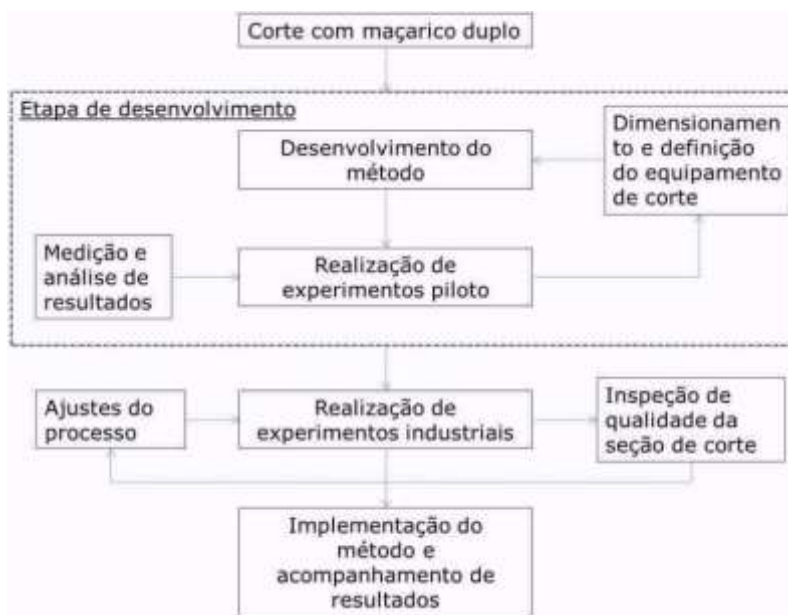


Figura 4.1 - Síntese das etapas para desenvolvimento das atividades.

As etapas propostas no fluxograma da figura 4.1 serão detalhadas nos tópicos a seguir.

4.1 Desenvolvimento do Método de Oxicorte Duplo

A proposta do oxicorte com Duplo Maçarico consiste no desenvolvimento do equipamento capaz de sustentar duas canetas de corte e gerar um aporte térmico localizado para a seção do Corte Principal conforme ilustrado na figura 3.12 (HIROFUMI, 2005). Neste sistema, os bicos dos maçaricos são posicionados defasados transversal e longitudinalmente entre si, com distâncias a serem otimizadas e determinadas após testes e aferições de temperatura na placa.

Os dimensionamentos dos bicos foram idealizados após testes e análise das curvas termográficas obtidas por experimentos pilotos. As distâncias transversais e longitudinais entre os bicos aliadas à velocidade de avanço de oxicorte devem ser otimizadas para se obter maiores temperaturas, encharques térmico na seção da linha do corte principal e maior homogeneidade térmica ao longo da espessura da placa.

Na figura 4.2 é apresentado um desenho esquemático para exemplificar o processo de oxicorte da placa de aço via duplo maçarico.

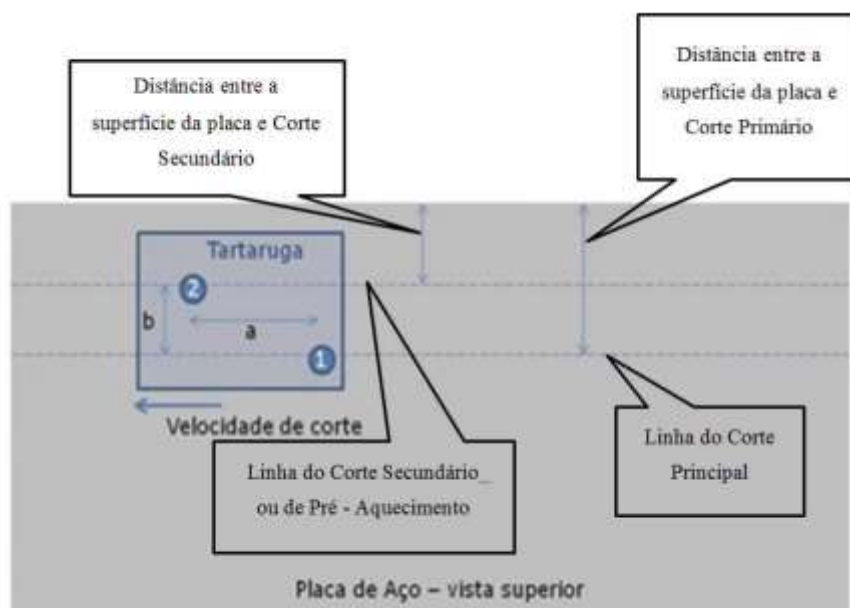


Figura 4.2 - Desenho esquemático da operação no oxicorte utilizando a técnica duplo maçarico.

Na figura 4.2 são apresentados os parâmetros que foram avaliados para desenvolvimento do método, sendo: (a) distância longitudinal entre os maçaricos, em mm; (b) distância transversal entre os maçaricos, em mm; (\leftarrow) velocidade de avanço do oxicorte, em mm/min, (1) posição do bico de oxicorte na linha do corte principal; (2) posição do bico de oxicorte na linha do corte secundário ou pré-aquecimento.

Duas distâncias da linha do corte principal e secundário foram escolhidas para o posicionamento dos termopares, uma a 25 mm e outra a 50 mm da superfície de oxicorte.

Outro fator levado em conta foi à velocidade de avanço do oxicorte, sendo escolhidos dois níveis, um a 90 mm/min e outro a 180 mm/min.

4.2 Definição do Equipamento

A definição do equipamento para a técnica de oxicorte por duplo maçarico vem através da necessidade do desenvolvimento de um equipamento portátil de fácil manuseio e operacionalizado por apenas um operador cortador, capaz de movimentar as duas canetas de corte com seus respectivos bicos, suporte e mangueiras de oxicorte. O aparato foi concebido por um suporte de canetas instalado em um carro de oxicorte portátil em que a defasagem dos bicos gera o efeito de pré-aquecimento localizado da seção de corte principal na placa. Na figura 4.3 é apresentada uma fotografia da máquina de corte portátil já com o suporte dos maçaricos e os maçaricos utilizados no desenvolvimento do trabalho.

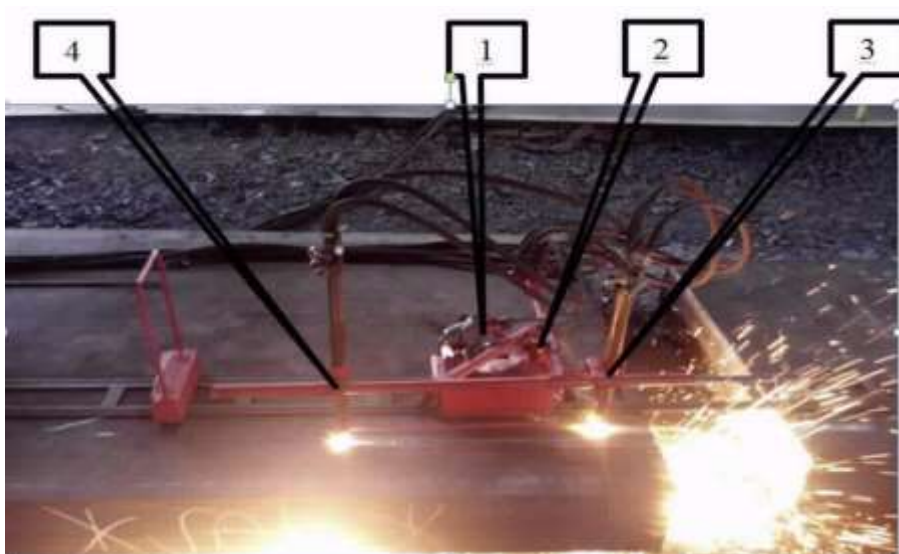


Figura 4.3 - Sistema de oxicorte via duplo maçarico: (1) máquina de oxicorte portátil, (2) suporte para posicionamento dos maçaricos, (3) maçarico de corte principal e (4) maçarico de corte secundário ou de pré-aquecimento.

Como insumos para o oxicorte pela técnica de duplo maçarico, foram utilizados os seguintes itens:

Suporte com máquinas de oxicorte portátil, figura 4.4.



Figura 4.4 – Foto interna Usiminas Ipatinga do suporte para maçaricos e máquina de oxicorte portátil.

- a) Canetas para corte mecanizado fabricante Harris modelo 198-2ft -250 mm x 35 mm e bicos de oxicorte série 1503#2, fabricados pela Condor conforme ilustrado nas figuras 4.5 e 4.6.



Figura 4.5 – Foto ilustrativa da caneta de oxicorte mecanizado utilizada nos testes da metodologia do oxicorte por duplo maçarico.



Figura 4.6 – Bico de oxicorte série 1503#2 utilizado nos testes da metodologia do oxicorte por duplo maçarico.

4.3 Experimentos

Como primeiro experimento, foram avaliados dados de temperatura da placa após ajuste dimensional utilizando oxicorte na linha do corte secundário. As temperaturas obtidas referem-se às posições de 25 mm e 50 mm afastadas da superfície de corte. Foram utilizados para as medições termopares tipo K com diâmetro da bainha de 6,0 mm, isolados do par termoelétrico em óxido de magnésio (MgO) com grau de pureza de 99,4% e capa protetora em ICONEL e um microcomputador portátil com sistema de aquisição de dados. Os termopares foram implantados ao meio e a $\frac{1}{4}$ da espessura da placa de 250 mm, conforme ilustrado na figura 4.7. As temperaturas foram medidas com velocidades de avanço de oxicorte de 180 e 90 mm/min.

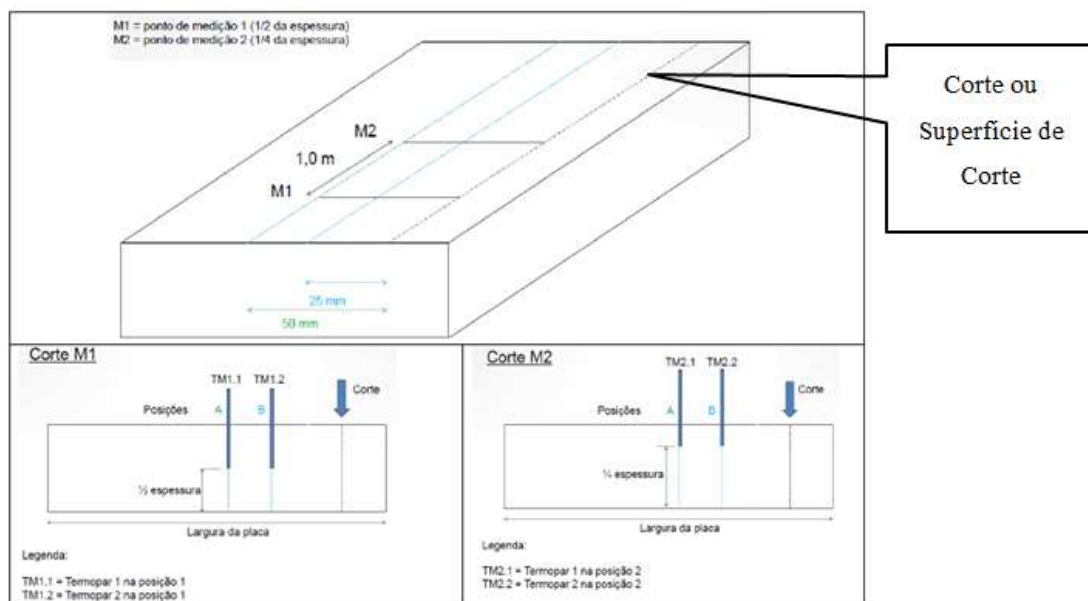


Figura 4.7 – Croqui do posicionamento dos termopares na placa de 250 mm de espessura para avaliação da temperatura durante oxicorte.

4.4 Metodologia para obtenção dos dados

Para a realização do experimento piloto e medição dos parâmetros, foi utilizada a técnica de inserção de termopares tipo “K” ao longo da espessura da placa, conforme ilustrado na figura 4.8.

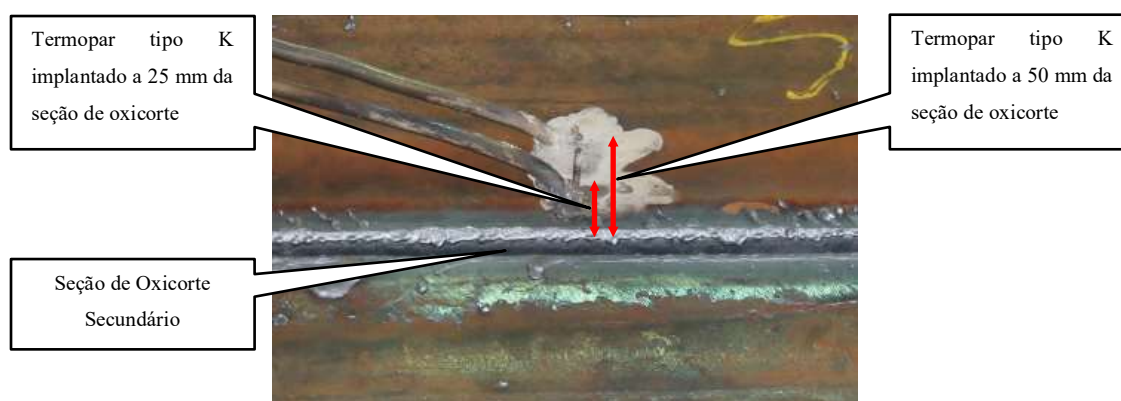


Figura 4.8 – Foto da montagem experimental ilustrando a implantação dos termopares tipo K com diâmetro da bainha de 6 mm, isolados do par termoeletrico em óxido de magnésio (MgO) com grau de pureza de 99,4% e capa protetora de INCONEL 600 na superfície da placa.

Os termopares foram posicionados em placas de 250 mm de espessura na linha da seção do corte principal, distantes uns dos outros de 1000 mm, a $\frac{1}{4}$, a $\frac{1}{2}$ e a $\frac{3}{4}$ da espessura da placa e distantes a 25 a 50 mm da posição do corte secundário ou de pré-aquecimento, conforme ilustrado nas figuras 4.9 e 4.10.

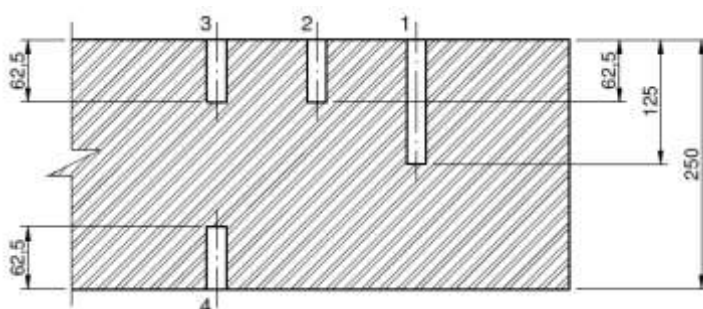


Figura 4.9 – Profundidade dos pontos medição e posicionamento dos termopares ao longo da espessura da placa. Dimensões em mm.

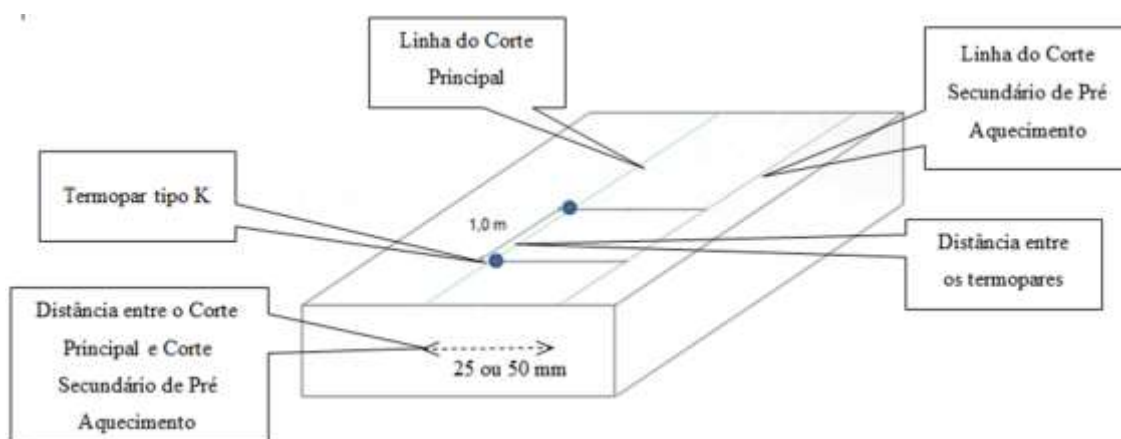


Figura 4.10 – Distância dos termopares à seção de corte secundário ao longo do comprimento da placa.

Para a obtenção e tratamento dos dados foi utilizado um microcomputador portátil, modelo midi logger GL 240, fabricado pela Grafhtec, conforme ilustrado pela figura 4.11.



Figura 4.11 - Microcomputador portátil com sistema de aquisição de dados do fabricante Grafhtec, modelo midi logger GL 240.

Para todos os testes realizados, as pressões de oxigênio e gás natural foram mantidas constantes trabalhando nas faixas de 12 a 14 kgf/cm² e 3 a 4 kgf/cm², respectivamente.

4.5 Experimento Industrial Piloto

Após a definição das condições de oxicorte e medição das temperaturas, foi iniciada a etapa de experimentos industriais. Nesta etapa foram realizados cortes para ajuste de dimensão de placas com diferentes composições químicas. As composições químicas selecionadas são aquelas em que o procedimento operacional Usiminas Ipatinga não permite o oxicorte na largura da placa. Estas placas são as potenciais candidatas ao enquadramento dimensional corte com a técnica duplo maçarico.

Para validação dos resultados, após o enquadramento da placa, foi aplicada a técnica de ensaio não destrutivo por líquido penetrante lavável. Após 30 horas do oxicorte, já com placas à temperatura ambiente, o processo de ensaio não destrutivo iniciou-se na seção de oxicorte com a remoção da carepa, envolvendo as seguintes etapas:

1. Raspagem da seção cortada via espátula de aço, conforme figura 4.12.



Figura 4.12 – Foto ilustrativa da raspagem via espátula na seção cortada.

2. Escovação da seção cortada via escova de aço e limpeza via ar comprimido, conforme figura 4.13.



Figura 4.13- Foto ilustrativa da escovação na seção cortada.

3. Aplicação do líquido penetrante lavável aquoso com pincel na seção de corte, conforme figura 4.14.



Figura 4.14 - Foto ilustrativa da aplicação do líquido penetrante na seção de corte.

4. Limpeza do líquido penetrante após 25 minutos com água corrente, escoando a água da quina da seção horizontal da placa para a seção vertical ou seção de corte principal, conforme figura 4.15.



Figura 4.15 – Foto ilustrativa da remoção do líquido penetrante aquoso lavável.

5. Após remoção do líquido penetrante e secagem natural da seção de corte, foi aplicado via spray, líquido revelador em toda área cortada, conforme figura 4.16;



Figura 4.16 – Foto ilustrativa da aplicação do líquido revelador.

6. Após o fim do ensaio não destrutivo, foi iniciada a inspeção visual da seção cortada (figura 4.17). Na inspeção são observadas descontinuidades que, após critérios de avaliação internos, padrão operacional, as placas são ou não liberadas para a laminação de tiras a quente.



Figura 4.17 – Foto da inspeção visual de placas após aplicação do líquido revelador.

Esse teste não destrutivo tem como objetivo favorecer a identificação visual de qualquer descontinuidade na seção cortada que desabonasse a placa a seguir para o processo subsequente de laminação a quente.

4.6 Laminação Experimental das Placas e Monitoramento dos Resultados

Algumas placas foram escolhidas para a realização da laminação a quente experimental, verificando-se a integridade das bordas das placas, conforme liberação de procedimento interno de líquido penetrante Usiminas Ipatinga. Após laminada a placa, outra verificação foi feita nas bordas dos produtos laminados a quente.

Com base nos resultados de inspeção de placas e de qualidade dos laminados, foram reajustados os critérios de aprovação de descontinuidades para as seções das placas cortadas com a técnica de duplo maçarico.

4.7 Treinamento do efetivo operacional na técnica do Oxicorte Duplo Maçarico e ensaio não destrutivo por Líquido Penetrante e Inspeção da placa após corte

Após todos os testes industriais e ajustes dos bicos do corte por duplo maçarico ao longo do desenvolvimento do trabalho, o efetivo responsável pelo corte e inspeção foi devidamente treinado no uso da técnica do oxicorte por duplo maçarico, da técnica do ensaio não destrutivo por líquido penetrante e inspeção da placa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados

5.1.1 Curvas Térmicas

Os perfis térmicos obtidos no primeiro experimento, com os posicionamentos relativos dos termopares a 25 e 50 mm da superfície de oxicorte e implantados ao centro e a $\frac{1}{4}$ da espessura da placa, são apresentados nas figuras 5.1a e 5.1b.

Para esse teste foi utilizado o fator velocidade de avanço do oxicorte. O nível utilizado para essa variável no primeiro experimento foi de 180 mm/min, velocidade fixa aplicada no oxicorte das placas Usiminas.

Como registro da temperatura no posicionamento do bico de corte principal, foi sugerido pela assessoria técnica da Nippon Steel, iniciar os trabalhos com distâncias longitudinais entre os maçaricos de corte principal e secundário ou distância L do desenho adaptado de (HIROFUME 2003), de 100 e 160 mm. Para identificar a temperatura em que a seção de corte do bico do maçarico principal estaria submetida, foram traçadas linhas verticais no gráfico de perfil térmico

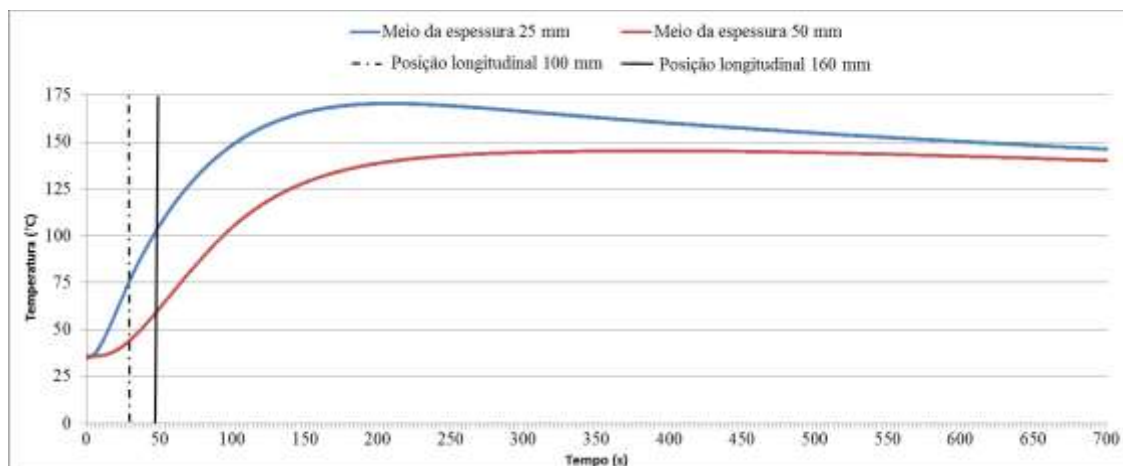


Figura 5.1a – Gráfico de relatório interno Usiminas do perfil térmico com o posicionamento dos termopares no centro da espessura da placa em posição relativa de 25 e 50 mm da superfície de oxicorte e velocidade de avanço de oxicorte de 180 mm/min.

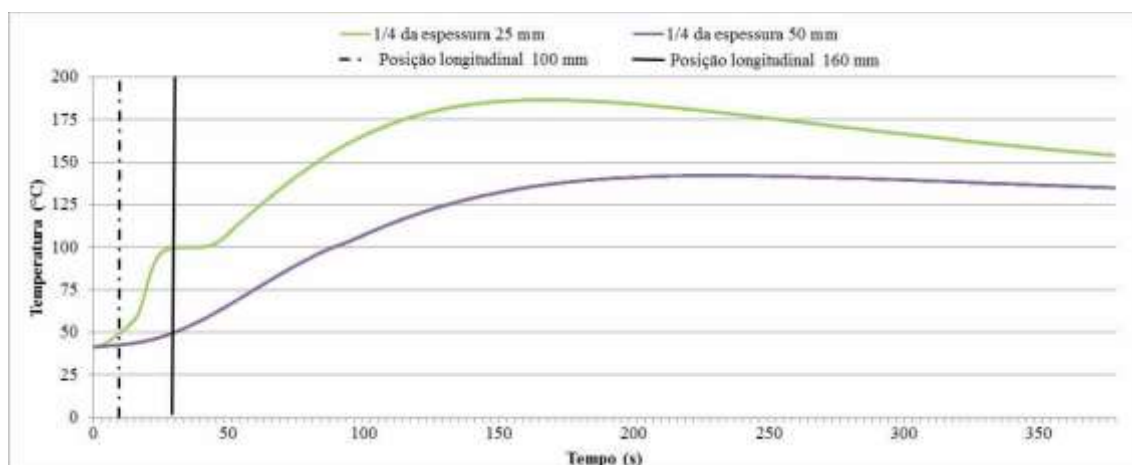


Figura 5.1b – Gráfico de relatório interno Usiminas do perfil térmico com o posicionamento dos termopares a 1/4 da espessura da placa em posições relativas de 25 e 50 mm da superfície de oxicorte e velocidade de avanço de oxicorte de 180 mm/min.

Como resultado do segundo experimento, tem-se nas figuras 5.2a e 5.2b os perfis térmicos obtidos com os posicionamentos relativos dos termopares a 25 e 50 mm da superfície de oxicorte e implantados ao centro e a 1/4 da espessura da placa.

O nível utilizado para a variável velocidade foi de 90 mm/min, velocidade teste aplicada no oxicorte.

Para identificação da temperatura no posicionamento do bico de corte principal, foi indicado pela assessoria técnica, iniciar os trabalhos com distâncias longitudinais entre os maçaricos de corte principal e secundário de 100 e 160 mm. Para identificar a temperatura em que a seção de corte do bico do maçarico principal estaria submetida foram traçadas linhas verticais no gráfico de perfil térmico.

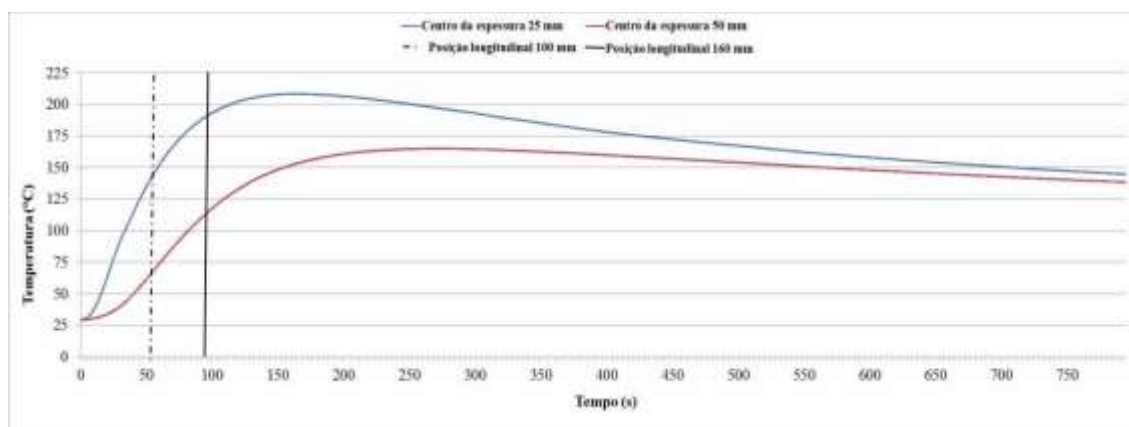


Figura 5.2a – Gráfico de relatório interno Usiminas do perfil térmico com o posicionamento dos termopares no centro da espessura da placa em posições relativas de 25 e 50 mm da superfície de oxicorte e velocidade de avanço de oxicorte de 90 mm/min.

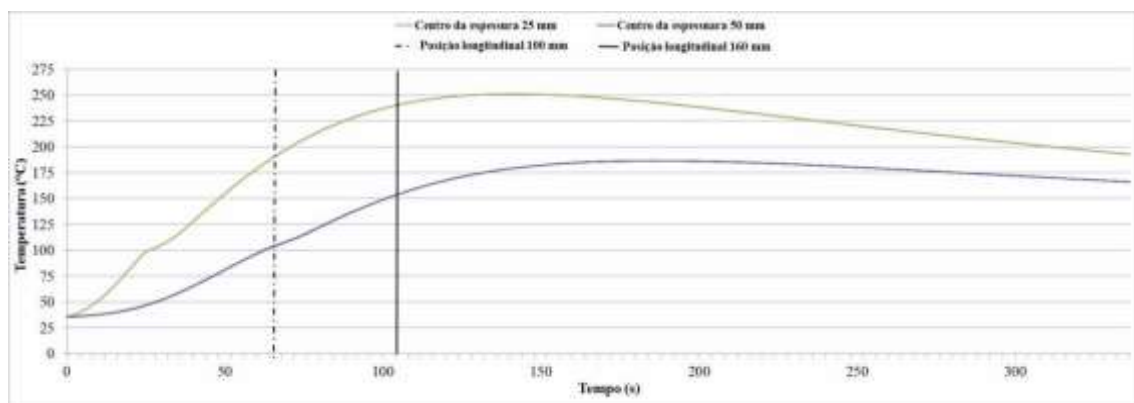


Figura 5.2b – Gráfico de relatório interno Usiminas do perfil térmico com o posicionamento dos termopares a 1/4 da espessura da placa em posições relativas de 25 e 50 mm da superfície de oxicorte e velocidade de avanço de oxicorte de 90 mm/min.

Com base na análise dos gráficos apresentados nas figuras 5.1a, verificou-se que a temperatura obtida pelo termopar ao meio da espessura, na distância longitudinal entre os maçaricos ou distância L (HIROFUME 2003), sugerida entre os maçaricos de 100 mm foi de aproximadamente 75°C a 25 mm da superfície de oxicorte e de 43°C para 50 mm da superfície de oxicorte.

As mesmas temperaturas considerando a distância longitudinal sugerida entre os maçaricos de 160 mm seriam aproximadamente 103 e 56°C, respectivamente.

Na figura 5.1b, a $\frac{1}{4}$ da espessura da placa, na posição da distância longitudinal entre os maçaricos ou distância L (HIROFUME 2003) sugerida entre os maçaricos de 100 mm, a temperatura foi aproximadamente 103°C a 25 mm da superfície de corte e de 50°C para 50 mm da superfície de corte.

As mesmas temperaturas considerando uma posição longitudinal de 160 mm seriam aproximadamente 131 e 67°C, respectivamente.

Esta diferença mostra que quanto maior a distância longitudinal (100 ou 160 mm) entre os maçaricos, maior é a temperatura obtida para a passagem do oxicorte na seção de corte principal. Desta forma entende-se que com a velocidade constante de avanço de corte (90 ou 180 mm) seriam necessárias maiores distâncias longitudinais entre os maçaricos para atingir as temperaturas máximas durante a passagem do maçarico de corte principal e conseqüentemente maiores aportes térmicos localizados na placa na seção de corte principal.

Para que se tenha a temperatura máxima de encharque térmico na seção de corte principal após o corte secundário, a distância longitudinal entre os maçaricos deve ser obtida considerando a velocidade de avanço de corte e o tempo para as temperaturas máximas nos perfis térmico dos gráficos 5.1 a e b e 5.2 a e b. Desta forma pode-se ajustar as distâncias dos bicos de corte com a máxima temperatura e encharque térmico na seção de oxicorte principal, não necessitando pré-aquecer todo o volume da placa, diminuindo assim, custos com combustíveis, tempo para encharque, movimentação e manuseio das placas.

Nas figuras 5.2 a e b são apresentados dados semelhantes aos apresentados nas figuras 5.1a e b, para velocidade de avanço de oxicorte de 90 mm/min. Da mesma forma, com base na análise dos gráficos apresentados nas figuras 5.1a e b, verificou-se que a temperatura, na posição da distância longitudinal sugerida entre os maçaricos de 100 mm ao meio da espessura foi de aproximadamente 157°C a 25 mm da superfície de

oxicorte e de 78°C para 50 mm da superfície de corte. As mesmas temperaturas considerando uma posição longitudinal de 160 mm seriam aproximadamente 195 e 120°C, respectivamente.

Na figura 5.2b, a $\frac{1}{4}$ da espessura da placa, na posição da distância longitudinal sugerida entre os maçaricos de 100 mm a temperatura foi de aproximadamente 189°C a 25 mm da superfície de corte e de 104°C para 50 mm da superfície de corte.

As mesmas temperaturas considerando uma posição longitudinal de 160 mm seriam aproximadamente 241 e 154°C, respectivamente.

Como resultados comparativos apresentados nas figuras 5.1, a e b e 5.2, a e b, verifica-se que existe uma diferença de temperatura entre o centro e a $\frac{1}{4}$ da espessura. Percebe-se que na posição ao centro da espessura a temperatura é inferior em relação à temperatura à $\frac{1}{4}$ da espessura, gerando gradiente térmico indesejado, podendo gerar variações volumétricas heterogêneas ao longo da espessura da placa e conseqüentemente trincas termomecânicas.

Com a redução da velocidade de avanço de corte houve um incremento da temperatura máxima medidas em ambas as posições transversais, 25 e 50 mm. Na posição 25 mm a temperatura é mais elevada, uma vez que se encontra mais próxima da frente de calor, porém, apresentando maiores diferenças de temperatura entre os termopares a $\frac{1}{4}$ e ao meio da espessura. Novamente podendo gerar variações volumétricas heterogêneas ao longo da espessura da placa e conseqüentemente com interações com regiões de falha ou descontinuidade estruturais na placa podendo gerar trincas termomecânicas.

Desta forma pode-se potencializar variações volumétricas ao longo da espessura da placa, gerando tensões termomecânicas que interagindo, podem contribuir para o surgimento ou propagação de trincas termomecânicas ao longo da seção cortada. Desta forma recomenda-se optar por configurações das variáveis de corte como velocidade de avanço de corte, distância entre seção de corte principal e secundário e distância longitudinal entre os maçaricos com maiores temperaturas e menores gradientes térmicos ao longo da espessura da placa.

Na tabela V.1 são apresentadas as temperaturas máximas obtidas a partir das curvas térmicas apresentadas nas figuras 5.1 a, b e figuras 5.2 a, b.

Tabela V.1 – Temperaturas máximas obtidas em testes variando a velocidade de avanço de oxicorte

Velocidade de avanço de oxicorte em mm/min	Posição do termopar em relação a superfície de oxicorte em mm			
	25		50	
	Posição dos termopares na espessura da placa			
	Meio	1/4	Meio	1/4
	Temperatura máxima dos termopares em °C			
180	171	189	146	143
90	209	252	165	187

5.1.2 Gradientes Térmicos Gerados

Devido às diferenças de temperatura observadas ao longo do centro e $\frac{1}{4}$ da espessura da placa, conforme ilustrado em figuras 5.3, a e b, verifica-se que, se o oxicorte for realizado nas temperaturas mais elevadas, haverá também uma diferença térmica mais acentuada entre o centro e $\frac{1}{4}$ da espessura. Desta forma, entende-se que, quanto mais perto a linha ou superfície do corte secundário ou de pré-aquecimento fica da linha ou superfície de corte principal maior será o gradiente térmico entre as regiões. Tal diferença pode ser potencializada quando o bico de corte principal atinge a região de interesse, levando a variações dimensionais e a ocorrência de trincas.



Figura 5.3a – Gráfico de relatório interno Usiminas da diferença das temperaturas máximas obtidas nas posições dos termopares a $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ da espessura da placa cortada via velocidades de avanço de oxicorte a 180 e 90 mm/min, posição dos termopares a 25 mm da superfície de corte.



Figura 5.3b – Gráfico de relatório interno Usiminas da diferença das temperaturas máximas obtidas nas posições dos termopares a $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ da espessura da placa cortada via velocidades de avanço de oxicorte a 180 e 90 mm/min, posição dos termopares a 50 mm da superfície de corte.

Neste sentido, o gradiente térmico ou a diferença de temperatura entre o centro e $\frac{1}{4}$ da espessura, se eleva quando se aproxima os bicos de corte transversalmente. Conforme mostrado nas figuras 5.3, a e b, ao se aproximar os bicos para 25 mm em velocidade de 180 mm/min a diferença ao longo da espessura é da ordem de 18 °C para os pontos de

máximo. Para a mesma velocidade e posição de 50 mm, a diferença é praticamente inexistente.

Outra constatação é o efeito da velocidade de corte. Com a redução da velocidade de corte para 90 mm/min houve um incremento significativo nas temperaturas de máximo. Em contra partida, as diferenças ao longo da espessura também se elevam. Na posição 25 e 50 mm as diferenças são de 43 e 22°C, respectivamente.

Novamente analisando os dados, entende-se que, além de temperaturas elevadas de pré-aquecimento, é importante buscar regiões de maior homogeneidade térmica ao longo da espessura da placa, para realizar o corte secundário. Assim, conforme dados, após tempos significativamente longos o calor se difunde e tende a minimizar os gradientes ao longo da espessura.

Os gráficos apresentados na figura 5.1a e 5.2a, mostram que, a partir de 300 segundos aproximadamente, as diferenças de temperatura entre o centro da espessura da placa são menores que 5°C. Além disso, as temperaturas estão acima de 100°C, podendo ser considerado um preaquecimento para o corte.

5.1.3 Otimização dos Resultados

Baseando-se nos valores máximos de temperaturas, tabela V.1, tempo para atingi-las, tabela V.2, e velocidade de avanço de oxicorte, chega-se à conclusão que as distâncias longitudinais sugeridas de 100 ou 160 mm entre os maçaricos devem ser maiores para que o corte principal iniciasse em temperaturas mais elevadas.

De fato, isto é bastante razoável em virtude do tempo necessário para que o calor difunda da região de corte para as posições mais ao interior da placa.

Com base nos tempos para temperatura máxima da tabela V.2 e velocidade de avanço de oxicorte de 90 ou 180mm/min, seria necessário posicionar o bico de corte principal entre aproximadamente 1,5 a 8,5 vezes das posições atuais de 100 e 160 mm, conforme sugestão na assessoria da Nippon Steel.

Para determinar essa distância L (HIROFUME 2003), entre os bicos de corte, buscou-se multiplicar a velocidade constante de avanço de oxicorte pelo tempo para atingir a temperatura máxima na seção de corte principal, tabela V.2.

Tabela V.2 – Tempos para atingir a temperatura máxima obtidas em testes variando a velocidade de avanço de oxicorte

Velocidade de Avanço de Oxicorte (mm/min)	Posição do termopar em relação a superfície de oxicorte (mm)			
	25		50	
	Posição dos termopares na espessura da placa			
	Meio	1/4	Meio	1/4
	Tempo para atingir a temperatura máxima (min)			
180	3,1	2,3	4,8	3,6
90	2,7	2,3	4,3	2,9

Para melhor extrair as condições de oxicorte da técnica de duplo maçarico, decidiu-se configurar uma nova obtenção dos perfis térmicos no corte duplo maçarico com os seguintes fatores:

- Distância transversal entre a superfície de oxicorte e posição do bico do maçarico principal de 50 mm, buscando a obtenção de menores gradientes térmicos gerados entre as temperaturas medidas no meio da placa e $\frac{1}{4}$ da espessura da placa;
- Velocidade de avanço de oxicorte de 90 mm, com o objetivo de obter maiores temperaturas máximas entre as medidas dos termopares implantados ao meio e $\frac{1}{4}$ da espessura da placa;
- Termopares implantados a $\frac{1}{4}$, a meio e a $\frac{3}{4}$ da placa de espessura de 250 mm.

Após obtenção dos dados, foram observados os resultados mostrados na figura 5.4.

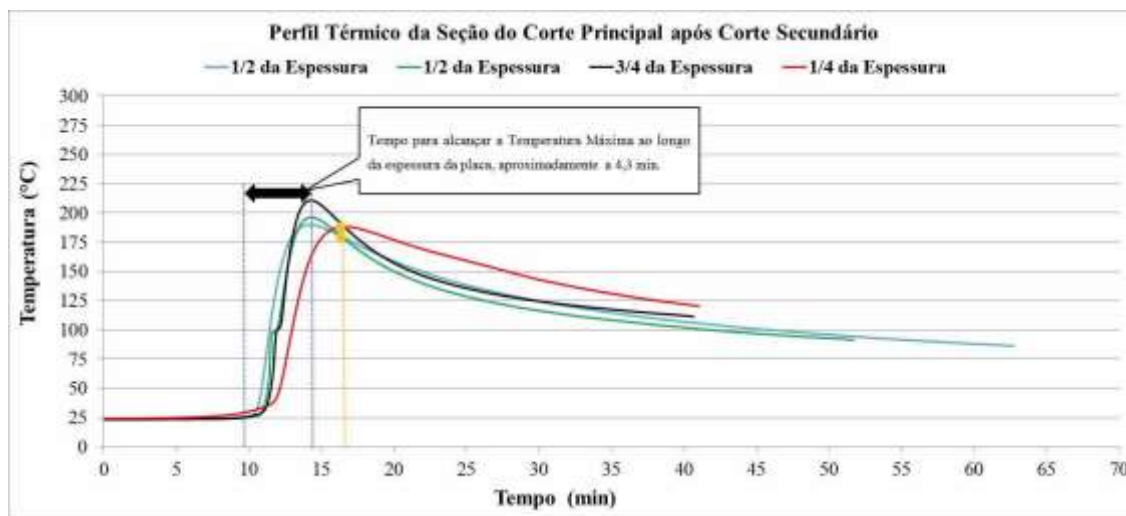


Figura 5.4 – Gráfico de relatório interno Usiminas da diferença das temperaturas máximas obtidas nas posições dos termopares a meio, a $\frac{1}{4}$ e a $\frac{3}{4}$ da espessura da placa cortada via velocidades de avanço de oxicorte de 90 mm/min, posição dos termopares a 50 mm da superfície de corte.

Com base nos resultados da figura 5.4, entende-se que, além das temperaturas elevadas de pré-aquecimento, é importante buscar regiões de maior homogeneidade térmica ao longo da espessura da placa, para que o corte ocorra com qualidade para aços com maiores teores de carbono e elementos de liga. Assim, após tempos significativamente longos, o calor se difunde e os gradientes ao longo da espessura são minimizados.

5.1.4- Laminação das placas e Monitoramento dos Resultados.

Com o intuito de se verificar a integridade das seções das placas cortadas e seu produto laminado, as placas foram selecionadas após ensaio de líquido penetrante e inspeção para o processo de laminação a quente.

Como resultado da implementação da técnica de corte duplo maçarico na Usiminas Ipatinga, houve um aumento na disponibilidade de placas enquadradas para a laminação de tiras a quente. Na figura 5.5 são apresentados os resultados de liberação das placas

após o oxicorte em função do carbono equivalente. A aprovação das placas para processamento na laminação de tiras a quente apresenta média de 92%, demonstrando o resultado do processo. Vale ressaltar que tratam-se de placas que tinham como destino a venda direta a terceiros ou geração de sucata, não sendo destinadas ao enquadramento via processo de oxicorte convencional, que, por sua vez, passaram a ser aproveitadas como matéria-prima na geração de laminado a quente.

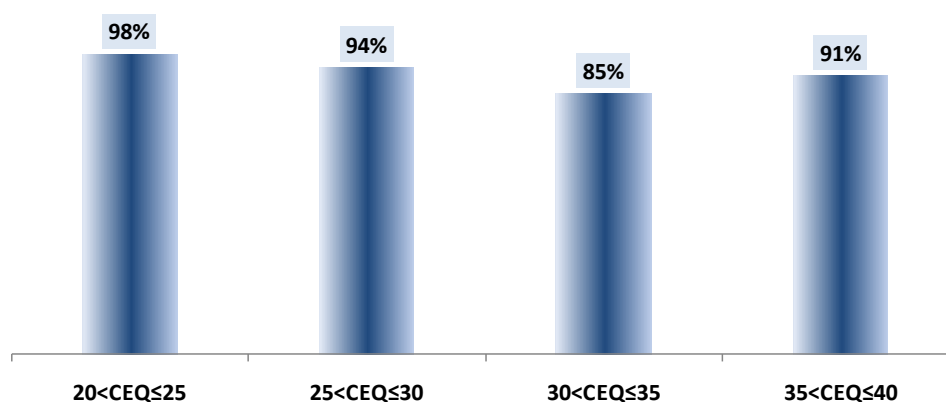


Figura 5.5. Índice de aprovação de placas após utilização da técnica do oxicorte por duplo maçarico entre os meses de Janeiro 2019 a Maio 2019.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi proposta e avaliada a metodologia de oxicorte com duplo maçarico para reduzir o número de trincas ou minimizar a sua gravidade após processo de oxicorte a gás em placas de aço com carbono inferior a 0,13%, teor de manganês maior do que 1,0% e nióbio + vanádio acima de 0,030%.

Após otimização dos parâmetros de oxicorte (velocidade e posicionamento dos maçaricos), foram obtidas temperaturas da ordem de 200 °C, homogeneamente distribuídas ao longo da seção de corte, favorecendo o ajuste dimensional de placas após aporte térmico localizado, objetivando assim, a redução da indução de trincas após o oxicorte convencional para ajuste dimensional.

No primeiro semestre de 2019, foram laminadas a quente aproximadamente 7 mil toneladas de placas. A técnica proposta no presente trabalho permitiu aproveitar 621 placas que não tinham seu dimensional adequado para laminação, não sendo possível seu enquadramento por técnica convencional de oxicorte.

Os resultados em escala industrial apresentaram uma média do índice de aprovação de placas de 92% e, conseqüentemente, redução de placas rejeitadas, com variação de largura entre topo e base, não autorizadas à atender produtos laminados a quente.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao trabalho, será avaliado o aproveitamento de placas com CEQ, Carbono Equivalente de Maiores Valores e seu índice de liberação após ensaio não destrutivo por líquido penetrante lavável e inspeção visual.

Será testado também o oxicorte aplicando gás combustível acetileno, buscando assim, promover maior aporte térmico localizado no processo de enquadramento da placa.

Outro fator a ser observado é a correlação e o efeito do hidrogênio medido no distribuidor do lingotamento contínuo na indução de trincas em seções de placas cortadas após oxicorte pela técnica de duplo maçarico.

Como fator de relevância, deverão ser observadas também as distâncias das superfícies de oxicorte via técnica duplo maçarico e sua interação com a zona de macrosegregação da placa, evitando assim potenciais trincas térmicas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ESAB. Literature. Factors Affecting Quality in Oxy-Fuel Cutting em: <www.esabna.com/literature/gas%20apparatus/miscellaneous/oxy-fuel_cutting_quality_0558006464.pdf>. Acesso em: 14 set. 2019, 13:20:00.

CONDOR. produtos para solda e corte. Bicos de Corte. Bico 1503. Disponível em: <www.condornet.com.br/condor/por/produtos/bicos/upload/1502_1503.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2018, 22:08:00.

FUNDERBURK. R. S. Key Concepts in Welding Engineering. Fundamentals of Preheat. *Welding Innovation*. v.14, n.2, 1997

GASMIG. Gás Natural. Características Físicas e Químicas em: <www.gasmig.com.br/GasNatural/Paginas/CaracteristicasFisicasQuimicas.aspx>. Acesso em: 14 mai. 2018, 22:15:00.

GASMIG. Gás Natural. Composição. Composição Típica em: <www.gasmig.com.br/GasNatural/Paginas/Composicao.aspx>. Acesso em: 14 mai. 2018, 22:20:00.

GRONG, O. Heat Flow and Temperature Distribution in Welding. In: *Metallurgical Modeling of Welding Second Edition*. Inglaterra: Ed. H. K. D. H. Bhadeshia, 1996. P. 1-112.

GUERRA, M.S.L. *Desenvolvimento de um novo processo de corte de materiais metálicos baseado no conceito de motor foguete*. Belo Horizonte: Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015. 138 p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).

KOBE STEEL, LTD. Tai Takafumi; Ayada Kenzo; Yukanami Tetsuji. *Method for gas-cutting continuously cast slab*. B22D11/00; B22D11/126; B23K7/00; (IPC1-7): B22D11/00; B22D11/126; B23K7/00. JPH10244348 (A), 04 março 1997.

KUO, S. Heat Flow During Welding. In: *welding Metallurgy*. EUA: Ed. John Wiley & Sons, 1987. p. 29-59.

MARQUES, P. V. et al. Soldagem e Corte a Gás. In: MARQUES, P. V. et al. *Soldagem; Fundamentos e Tecnologia*. 3ª Edição Atualizada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011. p. 161-180.

RAMALHO, J.P. *Oxicorte: Estudo da transferência de calor e modelamento por redes neurais artificiais de variáveis do processo*. São Paulo: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008. 129 p. (Tese, Doutorado em Engenharia).

RAMALHO, J.P. Processo de Oxicorte. Brasil. 2007. Artigo Técnico na seção “processo de corte” no site infosolda. Disponível em

<<http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/corte/processo-oxicorte.pdf>>. Acesso em: 20/03/2018.

ROSENTHAL, D. Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting. *Welding Research Supplement*. EUA, 1941. P.220-234.

SHANDONG IRON & STEEL CO. LTD. Ma Guangting; Ma Heng; Zhou Ping; Zhang Changhong; Li Qinghua; Wei Junguang; Geng Dali. *A flame cutting device*. B23K7/00.CN104985278 (A). 29 julho 2015.

SHOUGANG CORPORATION. Liu Jin Gang; Wang Weihua; GuLinhao; Chu Rensheng; Wang Lifeng; Zhu Zhiyuan; Li Zhanjun; HaoNing; Wang Yanfeng; Yan Xinhui; Wang Sen. *Flame-preheated cutting method for steel plate with high-carbon equivalent thickness of smaller than 30mm*. B23K7/00; B23K7/10. CN104759733 (A). 07 abril 2015.

SUMITOMO METAL INDUSTRIES. Satsuki Takashi. *Method for preventing fusion crack in ingot or billet*. B23K31/00; B23k7/00; (IPC1-7): B23K31/00; B23K7/00. JP2003062685 (A), 27 agosto 2001.

KOBE STEEL LTD. Takizawa Kensaburo; Kaji Haruo; Yano Kazuhiro; Okano Shigeo. *Gas Cutting Method Preventing Delayed Crack of Direct Hardening Type Steel Plate*. B23K7/00. JP19880089337(A). 18 outubro 1989.

NIPPON STEEL CORP. Nakajima Hirofumi. *Method of Cutting Steel*. B23K7/00. 2003-207804. 19 agosto de 2003.