

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ**

**ANÁLISE SIMULATÓRIA DO PROCESSO DE
SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA EM
UNIÃO DE CHAPAS DE AÇO BAIXO CARBONO
TIPO INTERTSITAL FREE**

Filipe da Silveira Magdalena
Vinicius Ferreira Almeida da Silva

Prof. Orientador: Hector Reynaldo Meneses Costa
Prof. Co-Orientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

**Rio de Janeiro
Novembro de 2014**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ**

**ANÁLISE SIMULATÓRIA DO PROCESSO DE
SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA EM
UNIÃO DE CHAPAS DE AÇO BAIXO CARBONO
TIPO INTERTSITAL FREE**

Filipe da Silveira Magdalena
Vinicius Ferreira Almeida da Silva

Projeto final apresentado em cumprimento
às normas do departamento de Engenharia Mecânica
do CEFET/RJ como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientador: Hector Reynaldo Meneses Costa
Prof. Co-orientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

**Rio de Janeiro
Novembro de 2014**

RESUMO

Entre as inovações tecnológicas no que tange à soldagem aplicada ao setor automotivo, destacam-se a pesquisa e desenvolvimento de solda nos aços baixo carbono, principalmente, os do tipo livres de intersticiais - IF, os quais apresentam em sua composição química baixo teor de C e N, elementos microligantes (Ti e/ou Nb), e alguns elementos de liga (P, Mn, Si), esses últimos são adicionados para aumentar a resistência do aço, sem comprometer as características de conformidade. Por isso, esse material é muito utilizado para a fabricação de elementos estruturais e chapas dos veículos, através da união destas pelo processo de soldagem por resistência a ponto (*Resistance Spot Welding – RSW*). Neste trabalho, com ênfase simulatória, será apresentada uma metodologia onde, a partir dos principais parâmetros da soldagem por resistência, possa-se chegar a valores ótimos para determinadas condições de soldagem. Para avaliação, serão utilizadas as configurações mais comumente utilizadas e comparadas com seus resultados de simulação e de laboratório experimental. Por fim, serão apresentadas simulações feitas no software Ansys® da solda, verificada através dos seus parâmetros mais importantes, bem como simulações de ensaios de tração e cisalhamento. Os principais resultados encontrados demonstram que pode se prever, com razoável proximidade à realidade, a junta soldada nas suas principais características bem como o comportamento do corpo de prova submetido aos ensaios apresentados neste trabalho.

Palavras-chave: Soldagem por Resistência a Ponto, Análise numérica, Simulação.

ABSTRACT

Among the technological innovation in welding relation apply to the automotive sector, it is emphasized the research and welding development on low carbon steel, especially the interstitials free type – IF, Which present in their chemical composition low Cand N, micro-alloying elements (Ti and/or Nb), and some alloying elements (P, Mn, Si), these latter are added to increase the steel strength, without compromise the compliance characteristics. Therefore, this material is very used on structural elements manufacturing and vehicle plates, through the plates union by the Resistance Spot Welding process (RSW). In this paper, with simulation emphasis, it will be shown a methodology where, as from the main resistance welding parameters, it could be possible arrives at optimal values to determine the welding conditions. For evaluation, it will be used the setup the most commonly used and they will be compared to the experimental lab results and simulation. Lastly, it will be shown the simulations designed on the Ansys® Software from welding process, been verified by the most important parameters, as well as tensile simulation test and shear test simulation. The main found results show that it could preview, with reasonable proximity to reality, the welded joint on their main characteristics, as well as their body behavior of mechanical specimen subjected to the tests presented in this paper.

Keywords: Resistance Spot Welding, Numerical Analysis, Simulation.

SUMÁRIO

1.	Introdução	13
1.1	Motivação	13
1.2	Justificativa	13
1.3	Objetivo e Metodologia	14
2.	Revisão Bibliográfica.....	15
2.1	O Processo de Soldagem por Resistência Elétrica (RSW)	15
2.1.1.	O processo de solda a ponto.....	18
2.2	Parâmetros de Soldagem a ponto por resistência e seus efeitos.....	22
2.2.1.	Corrente de Soldagem.....	22
2.2.2.	Força do Eletrodo.....	23
2.2.3.	Tempo de Soldagem	25
2.2.4.	Aços “Interstitial Free” (IF)	26
2.2.5.	Condução térmica	28
2.3	Modelagem do Problema	29
2.3.1.	Motivação do estudo	29
2.3.2.	Crítérios básicos do estudo em simulação	30
2.3.3.	Metodologia de cálculo térmico	31
2.3.3.1.	Cálculo de resistências	31
2.3.3.2.	Características do Aço IF proposto	33
2.3.3.3.	Análises	34
2.3.4.	Geometria do modelo.....	35
2.4	Estudo Térmico.....	37
2.4.1.	Dados de simulação	38
2.4.2.	Estudo da malha.....	41
2.4.3.	Análise de convergência	54
2.4.4.	Resultados.....	55

2.5	Estudo de Ensaio de Cisalhamento	61
2.5.1.	Geometria do modelo.....	61
2.5.2.	Estudo Estático	63
2.5.3.	Dados de simulação	64
2.5.4.	Estudo da malha.....	66
2.5.5.	Análise de convergência	77
2.5.6.	Resultados.....	78
3	Conclusão	83
4	Trabalhos Futuros	84
	Referências bibliográficas	85

Lista de Figuras

Figura 2.1 Processos de soldagem por resistência ;.....	15
Figura 2.2 Temperaturas no ponto de solda e demais regiões na máxima temperatura	16
Figura 2.3 Impressões dos pontos de solda localizados na parte traseira da carroceria do veículo.	17
Figura 2.4 Evolução da utilização dos diferentes processos de soldagem na indústria ao longo do tempo.	17
Figura 2.5 Ciclo de solda por resistência.....	18
Figura 2.6 Lente de Solda.....	19
Figura 2.7 Pontos principais de calor nos eletrodos e gradiente de temperatura após 20% do tempo de soldagem e no final do processo	21
Figura 2.8 Gráfico com relação entre alongamento e resistência em aços Automotivos.	26
Figura 2.9 Gráfico de tensão deformação em aços IF.	27
Figura 2.3.4.1 Dimensionamento do corpo de prova utilizado nos ensaios experimentais.....	36
Figura 2.3.4.2 Vista lateral da chapa com espessura das chapas e posição de sobreposição).	36
Figura 2.3.4.3 Modelo elaborado através do ANSYS® Workbench.	36
Figura 2.4.1 Vista lateral da região da lente.	37
Figura 2.4.2 Vista lateral da região da lente.	37
Figura 2.4.3 Local de aplicação da quantidade de calor.....	38
Figura 2.4.1.1 Gradiente de temperatura pelo método de estado de equilíbrio térmico.....	40
Figura 2.4.1.2 Gradiente de temperatura pelo método de transiente térmico.....	41
Figura 2.4.2.1 Malha 1.1 vista isométrica da lente.....	42
Figura 2.4.2.2 Malha 1.1 de topo do corpo de prova.....	43
Figura 2.4.2.3 Malha 1.1 de corte da região da lente.	43
Figura 2.4.2.4 Resultado da malha 1.1 de corte da região da lente.	44
Figura 2.4.2.5 Malha 1.2 vista isométrica da lente.....	45
Figura 2.4.2.6 Malha 1.2 de topo do corpo de prova.....	45
Figura 2.4.2.7 Malha 1.2 de corte da região da lente.	46
Figura 2.4.2.8 Resultado da malha 1.2 de corte da região da lente.	46
Figura 2.4.2.9 Malha 1.3 vista isométrica da lente.....	47
Figura 2.4.2.10 Malha 1.3 de topo do corpo de prova.....	48
Figura 2.4.2.11 Malha 1.3 de corte da região da lente.	48

Figura 2.4.2.12 Resultado da malha 1.3 de corte da região da lente.	49
Figura 2.4.2.13 Malha 2.1 vista isométrica da lente.....	50
Figura 2.4.2.14 Malha 2.1 de topo do corpo de prova.....	50
Figura 2.4.2.15 Malha 2.1 de corte da região da lente.	50
Figura 2.4.2.16 Resultado da malha 2.1 de corte da região da lente.	51
Figura 2.4.2.17 Malha 2.2 vista isométrica da lente.....	52
Figura 2.4.2.18 Malha 2.2 de topo do corpo de prova.....	52
Figura 2.4.2.19 Malha 2.2 de corte da região da lente.	52
Figura 2.4.2.20 Resultado da malha 2.1 de corte da região da lente.	53
Figura 2.4.3.1 Gráfico de análise de convergência.....	54
Figura 2.4.4.1 Vista isométrica do resultado do gradiente de temperatura;	55
Figura 2.4.4.2 Vista da face da região soldada do resultado do gradiente de temperatura;	55
Figura 2.4.4.3 Vista da face da região soldada do resultado do fluxo de calor;	56
Figura 2.4.4.4 Gráfico de variação de temperatura máxima pelo tempo;	56
Figura 2.4.4.5 Gráfico de variação do fluxo de calor máxima pelo tempo;	57
Figura 2.4.4.6 Solução com comprimento da lente;	59
Figura 2.4.4.7 Microscopia da secção transversal de uma solda a ponto por resistência	59
Figura 2.4.4.8 Solução com comprimento da lente com malha aparente;	60
Figura 2.4.4.9 Corte perpendicular a direção da solda;	60
Figura 2.5.1.1 Geometria do modelo de ensaio de cisalhamento	61
Figura 2.5.2.1 Vista lateral da região da lente unida.	63
Figura 2.5.2.2 Vista lateral da região da lente unida.	64
Figura 2.5.3.1 Gradiente de tensões máximas pelo método estrutural estático.....	65
Figura 2.5.3.2 Gradiente de tensões máximas pelo método estrutural transiente.	65
Figura 2.5.3.3 Gradiente de tensões equivalente pelo método estrutural estático.....	66
Figura 2.5.4.1 Malha 1.1 vista isométrica da lente.....	67
Figura 2.5.4.2 Malha 1.1 de topo do corpo de prova na região da lente.	68
Figura 2.5.4.3 Malha 1.1 de corte da região da lente.	68
Figura 2.5.4.4 Resultado da malha 1.1 de corte da região da lente.	69
Figura 2.5.4.5 Malha 1.2 vista isométrica da lente.....	70
Figura 2.5.4.6 Malha 1.2 de topo do corpo de prova na região da lente.	70
Figura 2.5.4.7 Malha 1.2 de corte da região da lente.	70
Figura 2.5.4.8 Resultado da malha 1.2 de corte da região da lente.	71

Figura 2.5.4.9 Malha 1.3 vista isométrica da lente.....	72
Figura 2.5.4.10 Malha 1.3 de topo do corpo de prova na região da lente.	72
Figura 2.5.4.11 Malha 1.3 de corte da região da lente.	72
Figura 2.5.4.12 Resultado da malha 1.3 de corte da região da lente.	73
Figura 2.5.4.13 Malha 2.1 vista isométrica da lente.....	74
Figura 2.5.4.14 Malha 2.1 de topo do corpo de prova na região da lente.	74
Figura 2.5.4.15 Malha 2.1 de corte da região da lente.	74
Figura 2.5.4.16 Resultado da malha 2.1 de corte da região da lente.	75
Figura 2.5.4.17 Malha 2.2 vista isométrica da lente.....	76
Figura 2.5.4.18 Malha 2.1 de topo do corpo de prova na região da lente.	76
Figura 2.5.4.19 Malha 2.2 de corte da região da lente.	76
Figura 2.5.4.20 Resultado da malha 2.2 de corte da região da lente.	77
Figura 2.5.5.1 Gráfico de análise de convergência.....	77
Figura 2.5.6.1 Vista isométrica do resultado das tensões aplicadas ao corpo de prova	78
Figura 2.5.6.2 Vista de topo das tensões aplicadas	79
Figura 2.5.6.3 Vista da região da lente em corte das tensões aplicadas	79
Figura 2.5.6.4 Deformação do corpo de prova em ensaio de cisalhamento	80
Figura 2.5.6.5 Vista da região da lente aproximada das tensões aplicadas com suavização ...	80
Figura 2.5.6.6 Vista da região da lente aproximada das tensões aplicadas sem suavização ...	81
Figura 2.5.6.7 Vista de topo do corte da lente.....	81
Figura 2.5.6.8 Vista de topo do corte da lente.....	82
Figura 2.5.6.9 Vista de topo da face da chapa.....	82

Lista de tabelas

Tabela 1 Composição química do Aço IF adotado para o estudo (%)	33
Tabela 2 Propriedades térmicas da chapa.....	33
Tabela 3 Propriedades Elétricas da Chapa	33
Tabela 4 Propriedades Elétricas da Chapa	33
Tabela 5 Dados obtidos de modelo experimental.....	34
Tabela 6 Parâmetros de simulação	39
Tabela 7 Tempo de passos.....	39
Tabela 8 Tabela de comparação de resultado dos métodos.....	40
Tabela 9 Parâmetros da Malha 1.1	42
Tabela 10 Parâmetros da Malha 1.2	44
Tabela 11 Parâmetros da Malha 1.3	47
Tabela 12 Parâmetros da Malha 2.1	49
Tabela 13 Parâmetros da Malha 2.2	51
Tabela 14 Tempo/temperatura máxima/ fluxo de calor;	58
Tabela 15 - Parâmetros de simulação estática	63
Tabela 16 - Valores de carga aplicada e tensão resultante máxima	64
Tabela 17 Parâmetros da Malha 1.1	67
Tabela 18 Parâmetros da Malha 1.2	69
Tabela 19 Parâmetros da Malha 1.3	71
Tabela 20 Parâmetros da Malha 2.1	73
Tabela 21 Parâmetros da Malha 2.2	75

Lista de Equações

Equação 1.....	20
Equação 2.....	23
Equação 3.....	31
Equação 4.....	31
Equação 5.....	32
Equação 6.....	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MPa	Mega Pascal
CP	Corpo de Prova
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety
ZTA	Zona termicamente afetada
HAZ	HeatAffected Zone
RWMA	Resistance Welders Manufacturers' Association
TSF	Força Tensão-Cisalhamento
ASTM	American Society for Testing and Materials
NBR	Normas Brasileiras
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DIN	Deutsches Institutfür Normung
ISO	International Organization for Standardization
IF	Interstitial Free

Capítulo 1

1. Introdução

1.1 Motivação

A competitividade trouxe à indústria automobilística nacional uma crescente busca por produtividade, qualidade e flexibilidade elevada para satisfazer a uma demanda crescente do mercado com produtos heterogêneos e diversificados. Isso gerou investimentos em sistemas de produção automatizados de processos criando, inevitavelmente, complexidade das instalações, exigindo cada vez mais capacitação intelectual e operacional dos profissionais que planejam o controle e a automação da linha de produção [1].

Neste ínterim há uma necessidade de sistemas de produção flexíveis e de caráter antropocêntrico e, ainda, com ferramentas de diagnóstico de fácil interação com os operadores. Alguns dos itens mais discutidos entre os fabricantes de automóveis são a necessidade de redução no consumo de combustível e a emissão de poluentes. Entre as principais ações tomadas está a redução de peso do veículo, que em se tratando do chassi de carros significa o uso de novos graus de aço de alta resistência, e outras tecnologias, em combinação com chapas de menor espessura [1].

1.2 Justificativa

Entre as inovações tecnológicas do setor automotivo destacam-se o crescimento em pesquisa e desenvolvimento dos aços baixo carbono livres de intersticiais (*Interstitial Free* – IF) para a fabricação de componentes de veículos, tais como: portas, carroceria, painel, entre outros. Esses componentes dos veículos são montados a partir da união de chapas de aços IF similares ou dissimilares de mesmas ou diferentes espessuras, conectadas pelo processo de soldagem por Resistência a ponto (*Resistance Spot Welding* – RSW).

A análise empírica dos resultados de soldas do tipo RSW é muito discutida dentro do meio acadêmico, principalmente devido a sua utilização na indústria em larga escala, principalmente na indústria automobilística e as crescentes modalidades de utilização.

1.3 Objetivo e Metodologia

Buscando contribuir na evolução destes estudos este trabalho visa analisar o processo de solda a ponto RSW em chapas aços IF através dos seus principais parâmetros. A partir da análise de parâmetros e processos, foi gerado um modelo matemático (simulação computacional) em que refletiu o comportamento o mais próximo possível da realidade, tanto da junta soldada em seus principais parâmetros (distribuição térmica; temperatura; perdas) quanto à resistência da junta soldada em determinados ensaios mecânicos. Comprovado finalmente que o modelo matemático proposto está de acordo com a realidade, apresentando assim uma opção ao ensaio empírico e testes para análise de resultados.

Capítulo 2

2. Revisão Bibliográfica

2.1 O Processo de Soldagem por Resistência Elétrica (RSW)

De acordo com a Resistance Welders Manufacturers' Association (RWMA), “Solda consiste na junção de duas ou mais peças de metal através da aplicação de calor e às vezes de pressão, e solda por resistência indica o campo da solda onde o calor de solda nas peças a serem soldadas é gerado pela resistência oferecida por essas peças à passagem de uma corrente elétrica”. Nos processos de soldagem por resistência sempre há a aplicação de uma pressão que garante a união das peças que são aquecidas por efeito Joule pela corrente elétrica que passa pelos eletrodos e as atravessa. Essa pressão deve ser aplicada às peças antes, durante e depois a passagem da corrente elétrica, o que permite uma boa área de contato entre as chapas, além de garantir o contato das mesmas durante o resfriamento.

Entre os processos mais comuns de soldagem por resistência, têm-se a solda a ponto, a solda por costura (que pode ser compreendida como uma solda a ponto contínua), e por fim a solda projeção, mostrados pela figura 2.1:

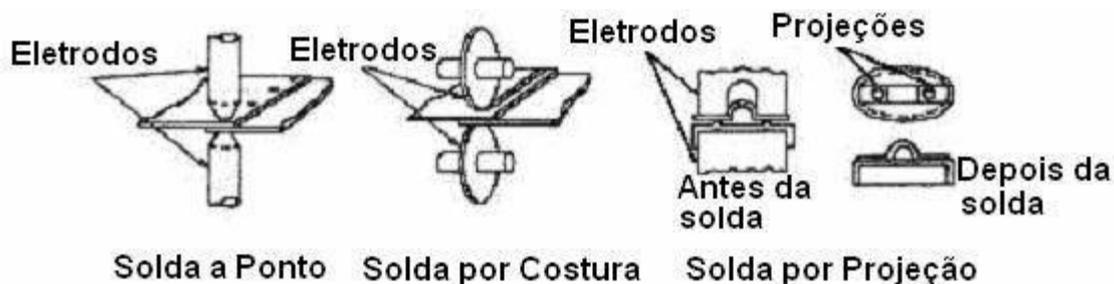


Figura 2.1 Processos de soldagem por resistência [2];

O aquecimento devido à resistência é desenvolvido em três interfaces: entre eletrodo e chapa, entre chapa e chapa, e por fim entre chapa e eletrodo, como pode ser observado na figura 2.2 , onde também é possível ver a distribuição de temperatura na solda a ponto.

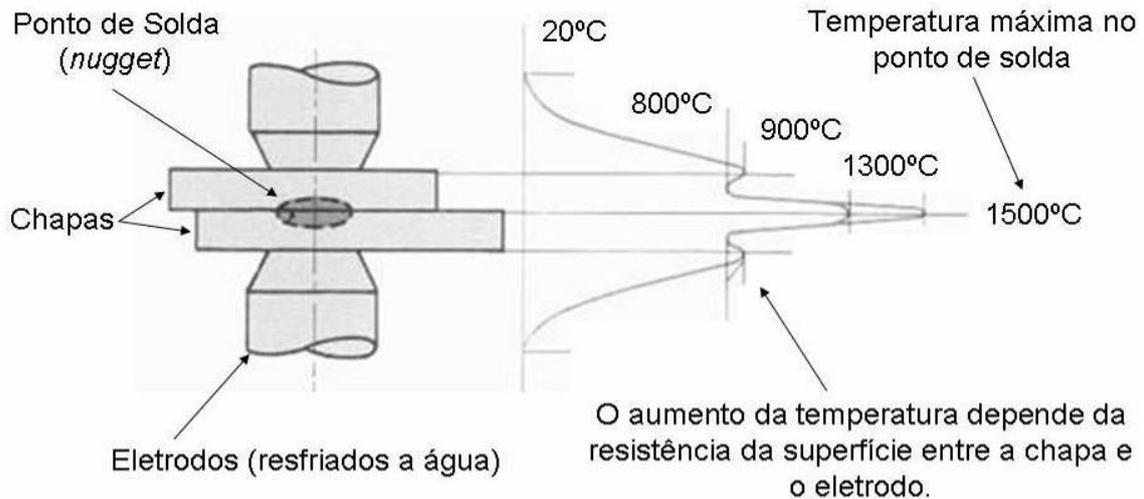


Figura 2.2 Temperaturas no ponto de solda e demais regiões na máxima temperatura [2]

O processo de soldagem por resistência a ponto (RSW) é o mais utilizado na indústria automotiva, é muito empregado na linha de produção, devido a sua elevada velocidade e simplicidade de operação, capacidade de automação e emprego de robôs. Por isso, atualmente no processo de montagem, um veículo de passeio recebe entre 2000 e 5000 pontos de solda em sua estrutura, que ao longo da linha de produção passa por vários processos de avaliação da conformidade para garantir a qualidade do veículo [3]. Existem também limitações do processo, e entre elas podem ser citados o custo elevado do equipamento, a demanda por energia elétrica durante a soldagem e o fato de o processo não ser adequado para unir peças de alto grau de complexidade geométrica.

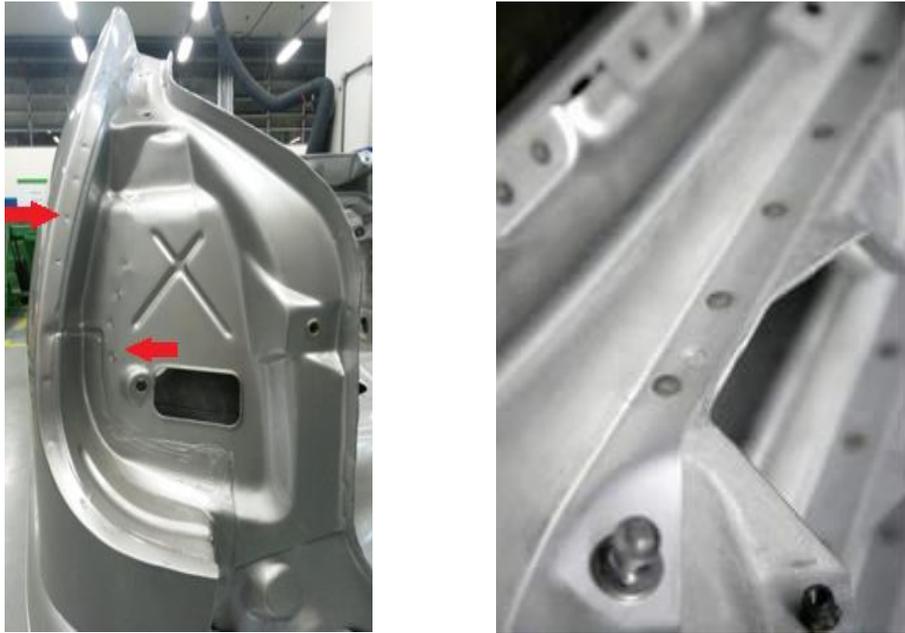


Figura 2.3 Impressões dos pontos de solda localizados na parte traseira da carroceria do veículo. [3]

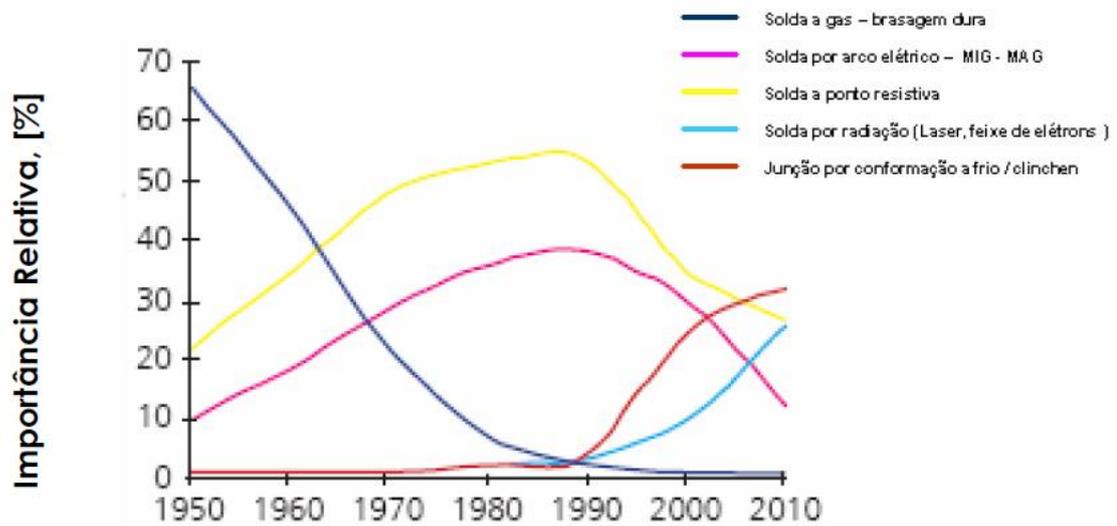


Figura 2.4 Evolução da utilização dos diferentes processos de soldagem na indústria ao longo do tempo. [1]

2.1.1. O processo de solda a ponto

No processo de soldagem a ponto por resistência as peças sobrepostas a serem soldadas são pressionadas uma contra a outra por meio de eletrodos movimentados por forças mecânica, pneumática, hidráulica ou uma mistura delas. Em seguida, um curto pulso de baixa tensão e alta corrente é fornecido e passa pelos eletrodos, não consumíveis, através do metal base. A resistência deste metal base à passagem da corrente ocasiona uma quantidade de calor nas superfícies de contato das peças proporcional ao tempo, resistência elétrica e intensidade de corrente a qual deverá ser suficiente para permitir que esta região atinja o ponto de fusão do material formando-se uma região fundida que recebe o nome de lente de solda [3]. Quando o fluxo de corrente cessa, a força dos eletrodos ainda é mantida enquanto o metal de solda rapidamente resfria e solidifica. Os eletrodos são retraídos após cada ponto de solda. A área por onde passa a corrente de soldagem, a forma e o diâmetro das lentes de solda geradas são limitados pelo diâmetro e contorno da face do eletrodo.

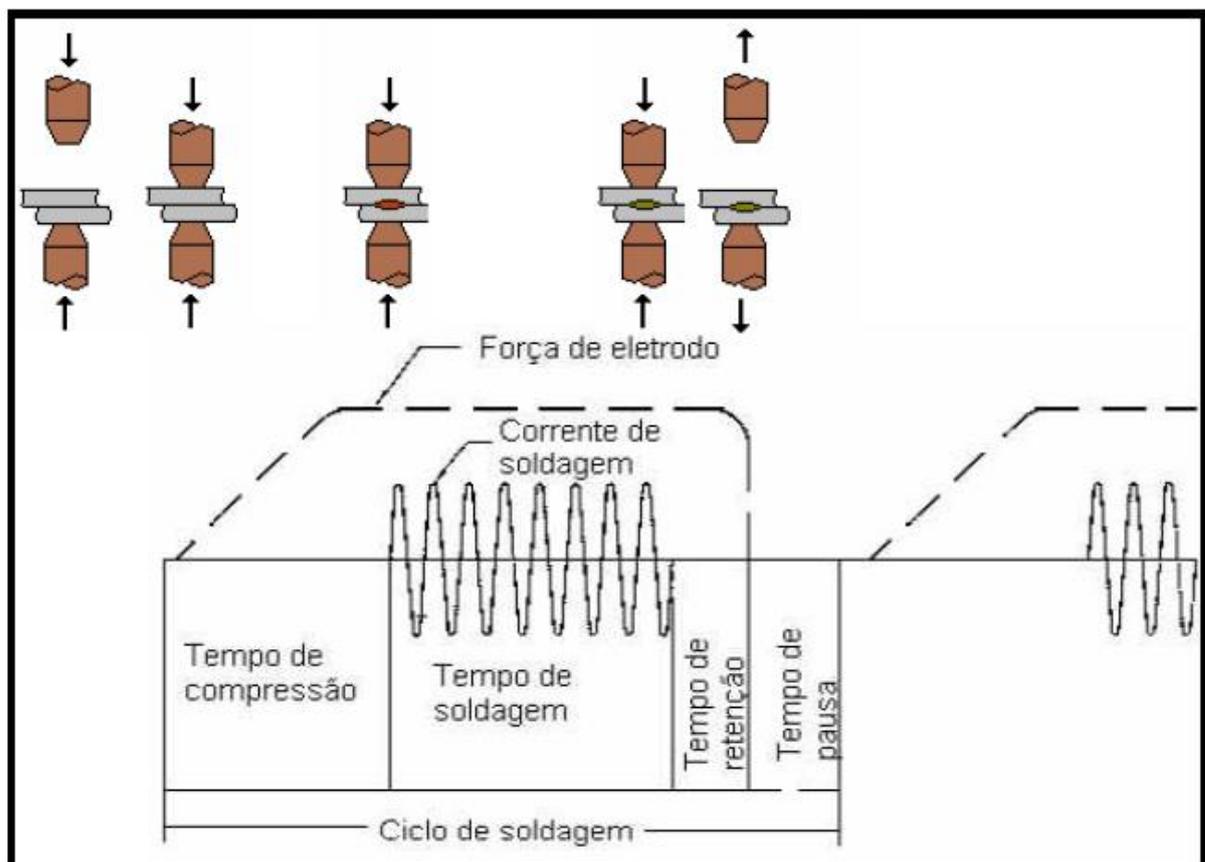


Figura 2.5 Ciclo de solda por resistência [3]

O ponto de solda (lente ou nugget) é produzido na área de contato dos eletrodos com a chapa durante o tempo de soldagem, enquanto a corrente de soldagem passa de um eletrodo ao outro através das chapas, e em virtude da resistência apresentada, o calor necessário para a fusão dos materiais será gerado. [2]

Após a conclusão do ciclo de soldagem, uma lente de solda deverá ter sido formada, como mostrado na Figura 2.6. A impressão é a uma impressão deixada pelos eletrodos na chapa durante o processo de soldagem, sendo desejável que ela seja a mínima possível.

Cada ponto de solda é realizado em um ciclo de soldagem, como mostrado na Figura 2.5. Neste caso a frequência da rede é de 60 Hz e 1 pulso ou ciclo terá a duração de: $1/60 = 0,0167s$. Este processo é ideal para soldar chapas finas, de até 3 mm. Maiores espessuras de chapas podem ser soldadas, mas máquinas especiais devem ser utilizadas. A indústria automotiva, a principal usuária deste processo, utiliza na construção dos automóveis entre 3000 e 4000 pontos de solda [4].

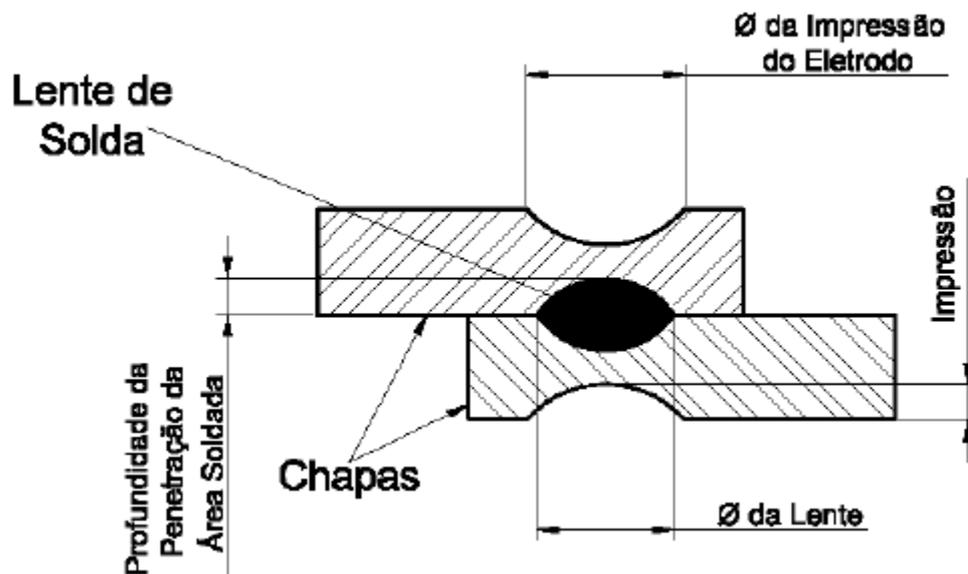


Figura 2.6 Lente de Solda [5]

Para uma boa qualidade do ponto de solda, a aplicação correta e coordenada de corrente elétrica e pressão mecânica de intensidade e duração apropriadas devem ser controladas. O excesso em uma combinação de corrente e pressão pode causar problemas como a expulsão do material fundido. No que tange ao equipamento de soldagem a ponto, a duração da corrente de solda deve ser suficientemente curta para prevenir excesso de calor nos eletrodos, o que reduziria significativamente sua vida útil.

Os fatores mecânicos que podem ser citados como os que estão sujeitos a modificações durante o processo de soldagem a ponto são: Tempo de compressão, Tempo de soldagem, Corrente de solda, Força do eletrodo, Tempo de resfriamento e o tipo do eletrodo utilizado, que pode variar de acordo com a chapa a ser soldada, pois esta pode apresentar ou não revestimento, além do tamanho do eletrodo, que determinará a área de contato entre eles e as chapas.

O calor requerido para o processo de soldagem por resistência é produzido pela resistência do metal base à passagem da corrente elétrica, denominado efeito Joule. Devido ao curto caminho da corrente elétrica no metal base e ao limitado tempo de soldagem, as correntes de soldagem relativamente altas são necessárias para desenvolver o calor de soldagem adequado. A geração de calor no local da solda resulta da ação combinada destes três parâmetros [5]:

- 1 – Corrente elétrica;
- 2 – Resistência Ôhmica do condutor (incluindo resistência da interface);
- 3 – Tempo de aplicação da corrente de soldagem.

Esses três fatores afetam a geração de calor, que é expresso pela equação 1:

$$Q = I^2 R t \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Q - Calor gerado [J];

I - Corrente elétrica [A];

R - Resistência [Ω];

t - Tempo de duração da corrente [s].

Na soldagem por resistência então, o calor gerado é proporcional ao quadrado da corrente de soldagem e diretamente proporcional à resistência e o tempo. Parte do calor gerado é utilizada para gerar a solda e parte é perdida por condução, convecção e radiação para o metal base e eletrodo. A magnitude destas perdas é geralmente desconhecida [4].

A Figura 2.7 mostra os efeitos compostos de geração de calor e dissipação nas peças e trabalho e eletrodos. Como se pode ver há 7 resistências conectadas em série, sendo elas:

- 1 e 7: resistência elétrica do material do eletrodo;
- 2 e 6: resistência de contato entre o eletrodo e o metal base. A magnitude desta resistência depende da condição da superfície do metal base e do eletrodo, do tamanho e do perfil da face do eletrodo e da força de eletrodo. Este é um ponto de alta geração de calor, mas a superfície do metal não atinge sua temperatura de fusão durante a passagem de corrente devido à alta condutividade térmica dos eletrodos (1 e 7) e ao fato de que eles são usualmente refrigerados a água;
- 3 e 5: resistência total do próprio metal base, que é inversamente proporcional à área da seção transversal por onde a corrente passa;
- 4: resistência do metal base da interface no local onde a solda deve ser formada. É o ponto de mais alta resistência e, portanto, o ponto de maior geração de calor.

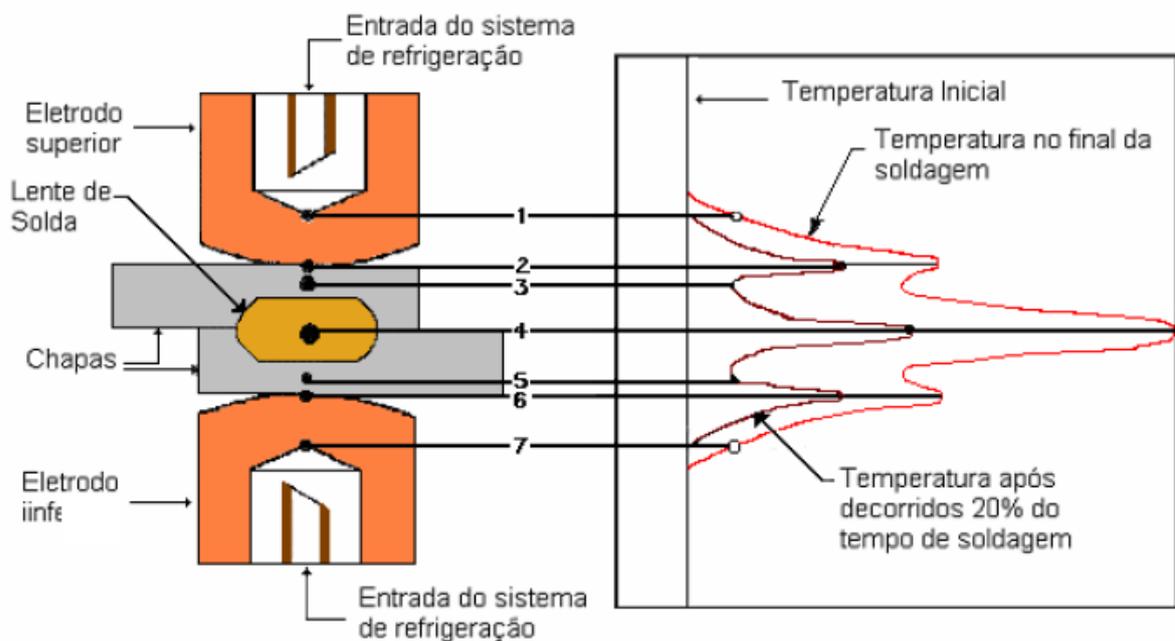


Figura 2.7 Pontos principais de calor nos eletrodos e gradiente de temperatura após 20% do tempo de soldagem e no final do processo [4].

2.2 Parâmetros de Soldagem a ponto por resistência e seus efeitos

A qualidade dos pontos de solda é influenciada principalmente por três parâmetros: tempo de solda, intensidade de corrente e força entre eletrodos os quais são aplicados em um ciclo de soldagem. A resistência elétrica da peça não é um parâmetro, mas tem muita importância, pois ela é responsável pela geração de calor devido à oposição à passagem da corrente (efeito Joule).

Os parâmetros de soldagem são funções desses três parâmetros, formados por valores programados em um comando, para execução de um determinado ponto de solda, levando-se em consideração a espessura das chapas, o tipo de material a ser soldado e o tipo de proteção superficial desse material. Existem outros parâmetros, que embora secundários, também influenciam na qualidade do ponto de soldagem. Estes parâmetros, a serem estudados, são relativos ao tempo em que a pinça se mantém fechada sem a passagem de corrente elétrica [3].

2.2.1. Corrente de Soldagem

Segundo a Equação 1, a corrente de soldagem tem um efeito muito maior na geração de calor do que a resistência ou o tempo, devido a sua influência quadrática. Sendo assim é uma importante variável a ser controlada.

Tanto a corrente alternada (A.C.) quanto a corrente contínua (D.C.) são usadas para produzir soldas a ponto. A indústria automobilística, com raríssimas exceções, dependia principalmente dos sistemas monofásicos de corrente alternada para a grande maioria de suas operações de soldagem. Com o advento de robôs e a necessidade resultante de componentes leves para a soldagem, um sistema integrado de controle transformador-retificador foi desenvolvido. Este sistema executa soldas com corrente contínua livre de flutuações devido à retificação de uma fonte de energia de alta frequência, o que representa uma alternativa econômica em relação aos tradicionais sistemas de corrente alternada [3].

A máquina de soldagem transforma a alta tensão da linha de transmissão da energia elétrica em baixa tensão e alta corrente. Algumas aplicações usam sistema monofásico de

corrente alternada de mesma frequência como na linha de transmissão de energia elétrica, usualmente 60 Hz.

A corrente de soldagem por unidade de área onde ela é aplicada caracteriza a densidade de corrente de soldagem. As variações na magnitude da corrente podem afetar esta densidade de corrente na interface da solda. Existe um limite inferior para a densidade decorrente abaixo do qual a fusão não ocorre (Calor suficiente deve ser gerado para compensar as perdas, por condução, para o metal base adjacente e os eletrodos), e também, um limite superior. Se este for muito alto, a espessura total das chapas entre os eletrodos é aquecida até a região plástica quando a zona de solda atingir a temperatura de fusão, e os eletrodos penetram profundamente nas chapas. Isto realmente ocorre quando a corrente é alta o suficiente para produzir expulsão de material da zona fundida e/ou na interface chapa/eletrodo. O resultado é uma vida útil baixa do eletrodo e soldas com baixa qualidade [4].

O limite de aceitação constitui o limite inferior e está relacionado diretamente ao diâmetro mínimo do ponto. Uma fórmula aproximada para estabelecer a relação entre diâmetro do ponto e a espessura das chapas soldadas é proposta por Koenigsberger,, conforme a Equação 2.

$$d = a\sqrt{t} \quad \text{Equação 2}$$

Onde a representa uma constante estabelecida empiricamente, cujo valor estima-se em torno de 3~6 e t a espessura da chapa mais fina. De maneira conservadora esta relação indica uma configuração de soldagem que não apresenta falha no metal base [3].

2.2.2. Força do Eletrodo

A força de eletrodo é aquela força aplicada às chapas pelos eletrodos durante o ciclo de soldagem. O fechamento do circuito elétrico através dos eletrodos e o material é assegurado pela aplicação desta força. A força é transmitida aos eletrodos de soldagem pela introdução de ar comprimido dentro de um cilindro de ar. A pressão desenvolvida nas

interfaces depende da área das faces do eletrodo em contato com as chapas [3]. As funções desta força ou pressão são:

- (1) Trazer as várias interfaces a um firme contato;
- (2) Reduzir resistência de contato inicial nas interfaces;
- (3) Impedir a expulsão do metal de solda da junta;
- (4) Consolidar a lente de solda.

A força de eletrodo, usualmente medida e expressa como um valor estático é uma força dinâmica em operação e é afetada pelo atrito e pela inércia das partes da máquina de solda que se movem.

A força do eletrodo afeta a resistência de contato e esta tem efeito dominante na formação do ponto de solda. A resistência R na equação 1, é influenciada pela força de soldagem através de seu efeito na resistência de contato da interface entre as chapas. As superfícies das chapas a serem soldadas, em escala microscópica, são compostas por uma série de picos e vales. Quando elas são submetidas à baixa força de eletrodo, o contato real na interface chapa/chapa será apenas nos picos, correspondendo a uma pequena porcentagem da área. Portanto, a resistência de contato será alta. À medida que a força de eletrodo aumenta, os pontos altos sofrem uma deformação e a área de contato na interface chapa / chapa aumenta, decrescendo, assim, a resistência de contato. Na maioria das aplicações, o material do eletrodo possui menor dureza do que as chapas. Conseqüentemente, uma aplicação adequada da força do eletrodo produzirá melhor contato nas interfaces eletrodo / chapa que na interface chapa / chapa [3].

Ao aumentar a força de soldagem, a corrente de soldagem também deverá ser aumentada até um valor limite. O efeito no calor total gerado, entretanto, pode ser inverso. À medida que a força aumenta, a resistência de contato e o calor gerado na interface diminuem. A força do eletrodo deve ser suficiente para conter o metal fundido dentro dos parâmetros dimensionais da face do eletrodo. Se a força for baixa, pode ocorrer expulsão de material na superfície externa da chapa, expulsão de material na interface chapa / chapa e desgaste prematuro do eletrodo. Quando a força é muito alta a resistência de contato na superfície dos dois metais será baixa, reduzindo assim o calor gerado nesta área. Com isso, os pontos de solda formados com alta força do eletrodo, tipicamente exibirão impressão excessiva na

superfície externa da chapa, pontos de solda com diâmetro abaixo do especificado ou até mesmo a falta de fusão [4].

2.2.3. Tempo de Soldagem

Pela Equação 1, observa-se que, mantendo-se a resistência total constante, a quantidade de calor gerado em qualquer parte do circuito é proporcional ao tempo de soldagem e ao quadrado da corrente de soldagem. O tempo requerido para obtenção de um diâmetro adequado de ponto de solda pode ser diminuído até um valor limite, independente de quanto a corrente de soldagem é aumentada. A taxa de geração de calor deve ser tal que soldas com resistência mecânica adequada sejam produzidas sem aquecimento excessivo dos eletrodos e a sua conseqüente deterioração.

O efeito do tempo de soldagem na distribuição de temperatura nas chapas e eletrodos é mostrado através das duas curvas na Figura 2.7. A curva à esquerda representa a temperatura em cada região após cerca de 20% do tempo de soldagem ter sido atingido e mostra que o aumento da temperatura nas superfícies sobrepostas das chapas, durante este período, é proporcionalmente mais baixo do que em outras regiões em relação ao aumento da temperatura durante o tempo de soldagem final [3] [2].

O processo de solda a ponto normalmente tem diferentes etapas. O tempo de cada etapa deve ser precisamente controlado mesmo que cada uma dure apenas uma fração de segundo. O tempo usado é medido em ciclos ou em milissegundos. A Figura 2.5 mostra os principais tempos de soldagem utilizados em soldagem por resistência.

Outros efeitos dos parâmetros de soldagem na geração de calor podem ser:

- As condições das superfícies das chapas a serem soldadas influenciam na geração de calor porque a resistência de contato é afetada por óxidos, sujeira, óleo e outros contaminantes na superfície.
- A composição química de um metal determina seu calor específico, temperatura de fusão, calor latente de fusão e condutibilidade térmica. Estas propriedades governam a quantidade de calor requerida para fundir o metal e produzir uma solda.

2.2.4. Aços “Interstitial Free” (IF)

A pesquisa e o desenvolvimento dos aços “Interstitial Free” (IF) ou aços livre de intersticiais, teve início na década de 70 com o objetivo principal de fornecer aos aços características de maior conformabilidade para a aplicação em chapas. O primeiro aço IF com características comerciais foi produzido por volta de 1970, como um aço com extra-baixo teor de carbono estabilizado ao titânio [6]. Ainda no início da década de 70, foram publicados os primeiros trabalhos, com aços IF estabilizados ao nióbio. Sobre a textura de chapas de aços com baixo carbono, [7] estudaram a influência da adição de nióbio sobre a textura de aços IF para aplicações em estampagem profunda. Estes aços são altamente conformáveis e soldáveis sem ponto de escoamento definido, conforme Figuras 2.8 e 2.9.

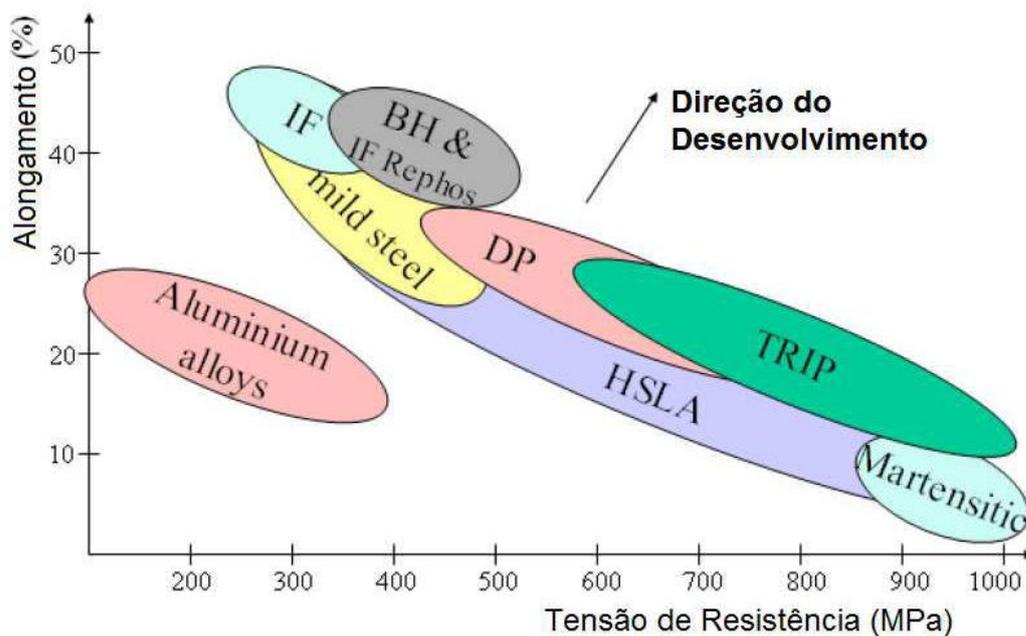


Figura 2.8 Gráfico com relação entre alongamento e resistência em aços Automotivos [3].

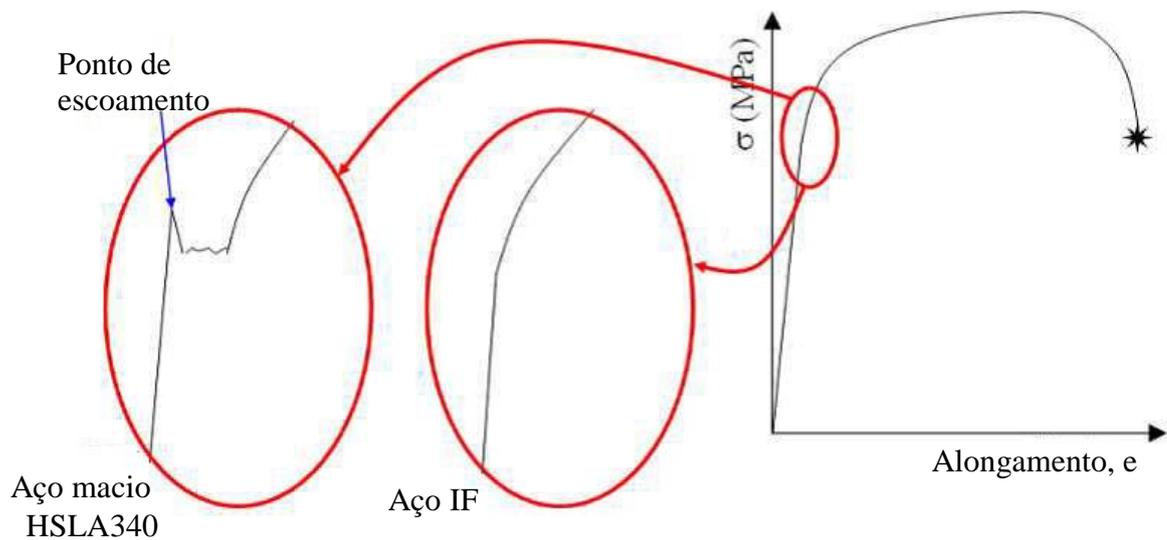


Figura 2.9 Gráfico de tensão deformação em aços IF [3].

Os aços IF começaram a ser produzidos em grande quantidade a partir de 1979, em substituição aos aços baixo carbono acalmados ao alumínio, quando as chapas de aço galvanizadas por imersão a quente começaram a ser utilizadas para confecção de painéis automotivos com elevada resistência à corrosão. Em função das características dos aços IF e do tipo de processamento feito nas linhas de galvanização, não existe atualmente uma classe de aços mais adequada para a produção de chapas com excelente conformabilidade. Seu uso não só reduziu o custo de manufatura das peças estampadas como também lhes proporcionou maiores níveis de qualidade [8].

Nos últimos anos, a produção em escala comercial dos aços livre de intersticiais apresentou grande crescimento. A produção da japonesa Nippon Steel duplicou no período de 1986 a 1992. Em 1990, todos os produtores japoneses de aço manufaturaram uma quantidade total de mais de 3 milhões de toneladas de aços IF [9]. Na Europa e América do Norte, a produção de aços IF também se desenvolveu em ritmo acelerado. Dados da alemã Thyssen mostraram um crescimento no período de 1983 a 1990, de aproximadamente 400 mil toneladas. Além dos grandes centros siderúrgicos, a produção comercial dos aços IF já foi iniciada na Coreia do Sul, e seu desenvolvimento científico e tecnológico já atinge outros países, entre eles o Brasil [9].

Os aços IF têm sido adotados com sucesso nos últimos anos na fabricação de painéis para a carroceria de automóveis. Eles apresentam níveis muito altos de estampabilidade em função de seus baixos teores de átomos intersticiais, como C e N, que são menores que 0,003

e 0,004%, respectivamente. Essa condição lhes proporciona baixo limite de escoamento e alta resistência à redução de espessura durante a deformação a frio. Os aços IF também não sofrem envelhecimento, uma vez que o carbono está totalmente combinado na forma de precipitados [23].

2.2.5. Condução térmica

Um dos fatores mais importantes na condução de calor é determinar o campo de temperaturas submetidas às condições de contorno, ou seja, é desejável o conhecimento da distribuição da temperatura sobre o meio. Uma vez conhecido a distribuição, através da lei de Fourier, é possível determinar o fluxo térmico condutivo, que consiste na equação 7:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(k \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k \frac{\delta T}{\delta z} \right) + q = \rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} \quad \text{Equação 7}$$

2.2.5.1. Regime permanente

A condução em regime permanente ocorre em muitos casos da engenharia apesar de sua simplicidade matemática. Mesmo não apresentando fielmente resultados condizentes com a realidade, é possível alcançar valores aproximados ao comportamento real [11].

Em regime permanente não há variação da quantidade de energia armazenada, reduzindo a equação 7 à equação 8:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(k \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k \frac{\delta T}{\delta z} \right) + q = 0 \quad \text{Equação 8}$$

Com este fator, a variação do tempo não interfere na variação de energia, tornando o cálculo menos preciso.

2.2.5.2. Regime transiente

Em caso de regime transiente os problemas de condução de calor dependem do tempo, e nos cálculos, as condições de contorno são alteradas conforme o período e resolução de cada etapa do cálculo. Por exemplo, se uma chapa de aço é aquecida em um ponto, a tendência é que o calor gerado neste ponto se distribua sobre a superfície até que uma distribuição de temperatura estacionária seja alcançada. A transferência de energia ocorre também no interior da chapa de aço por condução para a superfície e a temperatura em cada ponto decresce até uma condição de regime permanente seja alcançado.

Em regime transiente a equação do fluxo térmico de condutivo é considerada integralmente a equação 7.

2.3 Modelagem do Problema

A aplicação do método de elementos finitos em análise numérica computacional vem sendo utilizada com maior frequência no decorrer dos últimos anos. O motivo se dá primeiramente pelo aperfeiçoamento de softwares com interfaces mais intuitivas facilitando o manuseio, a interação com outros programas de modelagem e a possibilidade de desenvolvimento de modelos analíticos com comportamento cada vez mais próximo da realidade. Este método proporciona o estudo de engenharia viabilizando a otimização de projetos, proporcionando menor custo na etapa de fabricação e testes.

2.3.1. Motivação do estudo

A motivação para aplicação do ANSYS® ao estudo se dá pela facilidade de acesso que a Instituição de Ensino dispõe em seus laboratórios de informática e disposição de aulas de elementos finitos com base no ANSYS® ADPL - multiphysics. Além disso, o ANSYS® é um dos softwares mais completos em termos de simulação com análise de elementos finitos e mais conhecido no mercado, sendo utilizado pelas maiores empresas de engenharia.

Foi tomado como base na bibliografia [3], que apresentava modelagem numérica com utilização do ANSYS® Workbench. Este estudo apresentava simulação da transferência de calor do eletrodo para as chapas e comportamento fluido dinâmico do fluxo de resfriamento na ponta do eletrodo pelo fluido refrigerante. Por outro lado o trabalho realizado no presente estudo envolve diretamente o comportamento da distribuição do calor sobre a região da lente formada pela soldagem, evidenciando o tamanho da mesma.

A apresentação dos resultados obtidos na bibliografia [3] foi tida como critério final para determinação do uso do ANSYS® para obtenção dos resultados deste estudo.

No presente estudo, foi desenvolvido simulações do comportamento da distribuição do calor no instante de soldagem, para análise de geometria da lente e ZTA (Zona termicamente afetada) e ensaio de cisalhamento da solda.

2.3.2. Critérios básicos do estudo em simulação

Na concepção de simulações por método de elementos finitos é de extrema importância a criação de um modelo buscando correções de erros pertinentes ao erro do modelo matemático. Para validação de um modelo analítico, são considerados três os pontos cruciais para minimizar os erros do uso indevido do modelo:

1. Uso correto do Software CAD/CAE pelos correspondentes analistas;
2. O uso de hipóteses corretas nas definições das condições de contorno, carregamento, propriedades de material, modelos de turbulência;
3. Considerar o erro no approach metodológico do problema (aproximar uma análise transiente por uma estática, por exemplo);

Para erros de aproximação inerentes aos métodos numéricos pode-se incluir:

4. O erro devido à discretização do domínio – em outras palavras, a Malha (Mesh) do modelo;

Em termos de análise estrutural, quanto mais grosseira a malha do elemento, maior será a rigidez do modelo analisado, proporcionando, em certos casos, resultados com grandes

imprecisões numéricas. Da mesma forma, em análise térmica é possível identificar o gradiente de temperatura com menor precisão.

2.3.3. Metodologia de cálculo térmico

Este tópico aborda da metodologia utilizada para calcular a geração de calor por efeito Joule e método de cálculo do modelo numérico.

2.3.3.1. Cálculo de resistências

A metodologia para cálculo da resistência na lente foi adotada a equação estudada pelo Nascimento (2008) Equação 3:

$$R_{\text{total}} = R_{\text{Material}} + R_{\text{Revestimento}} + R_{\text{Contato}} \quad \text{Equação 3}$$

Resistência elétrica do material é definida pela Equação 4:

$$R_{\text{Material}} = \frac{\rho L}{A} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

ρ = Resistividade elétrica.

L = Comprimento do percurso da corrente.

A = Área transversal do percurso da corrente.

Resistência elétrica do revestimento ou película é definida pela Equação 5 :

$$R_{\text{Revestimento}} = \frac{\rho_t \cdot \xi H}{F} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

ρ_t = Resistividade elétrica do revestimento ou da película.

ξ = é o fator pressão (0,2 para superfície considerável elástica, 1,0 para totalmente plástica e 0,7 para uma aproximação razoável).

H é a dureza do material.

F é a força compressiva realizada pelos eletrodos.

A resistência elétrica de contato entre o eletrodo e a chapa, ou resistência de constricção é calculada pela Equação 6:

$$R_{\text{Contato}} = 0,89\rho \left(\frac{\xi H}{nF} \right)^2 \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

n = Número de pontos de contato;

ρ = Resistividade do ponto de contato;

O tempo adotado é descrito em Ciclos (cy) que é definido em 1/60 s. O tempo de exposição à corrente elétrica irá definir as propriedades dimensionais e resistividade mecânica da Lente.

2.3.3.2. Características do Aço IF proposto

O material adotado no presente estudo é a liga de Aço IF livre de intersticial ao titânio com revestimento de zinco 60g/m² e espessura de 0,75mm.

A composição química do material estudado é descrita na Tabela 6

Tabela 1 Composição química do Aço IF adotado para o estudo (%)

C	Mn	P	S	Si	Al	Ti	Nb	N
0,0026	0,11	0,01	0,008	0,007	0,038	0,055	0,002	0,004

A tabela 7 apresenta os valores das propriedades térmicas e a tabela 8 os valores das propriedades elétricas do Aço IF:

Tabela 2 Propriedades térmicas da chapa

Propriedades	Chapa	Unidade
Densidade	786,00	Kg/m ³
Condutividade térmica	52,90	W/m.K
Calor específico	486	J/kg.K

Tabela 3 Propriedades Elétricas da Chapa

Propriedades	Chapa	Unidade
Resistividade	$4,56 \cdot 10^{-7}$	Ohm.m
Condutividade Elétrica	$1 / 4,56 \cdot 10^{-7}$	Ohm ⁻¹ .m ⁻¹

Tabela 4 Propriedades Elétricas da Chapa

Propriedades mecânicas do Aço IF	Padrão	Máximo	Mínimo
Limite de Escoamento (MPa)	182	240	140
Limite de Resistência (MPa)	296	330	270
Alongamento (L = 80)	43	99	40
Dureza (HRB)	37	-	-
Rugosidade (µm)	0,8-0,7	1,5	0,7

2.3.3.3. Análises

Foi adotado o parâmetro descrito na tabela 5 como referência neste estudo.

Tabela 5 Dados obtidos de modelo experimental [3].

Parâmetros	Metodologia de Cálculo
Tempo de exposição	0,15s/ 9cy
Tempo de retenção	0,14s/ 8cy
Diâmetro da lente formada	4,1 mm
Área de aplicação da Quantidade de calor	13,2 mm ²
Espessura de Chapa	0,75 mm

De acordo com os dados do material, a dimensão da lente e tempo, Pode se calcular a resistência da Solda com as seguintes informações:

- Diâmetro da ponta do Eletrodo: 4,1 mm
- Área de contato do eletrodo com a chapa: 13,20mm² = 13,2. 10⁻⁶m²
- Dureza do Aço IF: 37HRB
- Percurso da corrente (soma da espessura das chapas): 0,75mm + 0,75mm = 1,5mm

Para fins de cálculo de projeto inicial, foi adotado a resistência na lente equivalente a resistência do material descrito pela Equação (3). Obtendo o resultado:

$$R_{\text{Revestimento}} = \frac{4,56 \cdot 10^{-7} * 0,7 * 37}{2000}$$

$$R_{\text{Revestimento}} = 5,9 \cdot 10^{-9} \text{Ohm} \quad (\text{valor desprezível})$$

$$R_{\text{Contato}} = 0,89 * 4,56 \cdot 10^{-7} * \left(\frac{0,7 * 37}{1 * 2000} \right)^2$$

$$R_{\text{Contato}} = 6,81 \cdot 10^{-9} \text{Ohm} \quad (\text{valor desprezível})$$

$$R_{\text{Material}} = \frac{4,56 * 10^{-7} * 1,5 * 10^{-3}}{13,2 * 10^{-6}}$$

$$R_{\text{Material}} = 5,18092 * 10^{-5} \text{ Ohm}$$

$$R_{\text{total}} = R_{\text{Material}} + \cancel{R_{\text{Revestimento}}} + \cancel{R_{\text{Contato}}}$$

$$R_{\text{total}} = 5,18092 * 10^{-5} \text{ Ohm}$$

O cálculo das resistências do revestimento e contato apresentaram valores significativamente abaixo do valor encontrado na resistência do material, que apresentou quatro algarismos significativos a mais. Portanto as resistências do revestimento e contato não foram consideradas nos cálculos.

Aplicando a Resistência a Equação 1 da quantidade de calor, considerando o tempo de 9cy (0,15s) e corrente de 7,7kA, é encontrado o valor abaixo:

$$Q = I^2 R t$$

$$Q = (7700)^2 * 5,18092 * 10^{-5} * 0,15$$

$$Q = 460,80W$$

2.3.4. Geometria do modelo

O *Software* utilizado para elaboração da geometria deste projeto foi o ANSYS® Workbench DesignModeler, software do pacote ANSYS® 15. Através desta ferramenta, foi realizada a modelagem do corpo de prova (CP) com as mesmas dimensões do CP usado nos estudos de referência. As Figuras 2.3.4.1 e 2.3.4.2 mostram os desenhos técnico do modelo e a Figura 2.3.4.3 o modelo elaborado através do software.

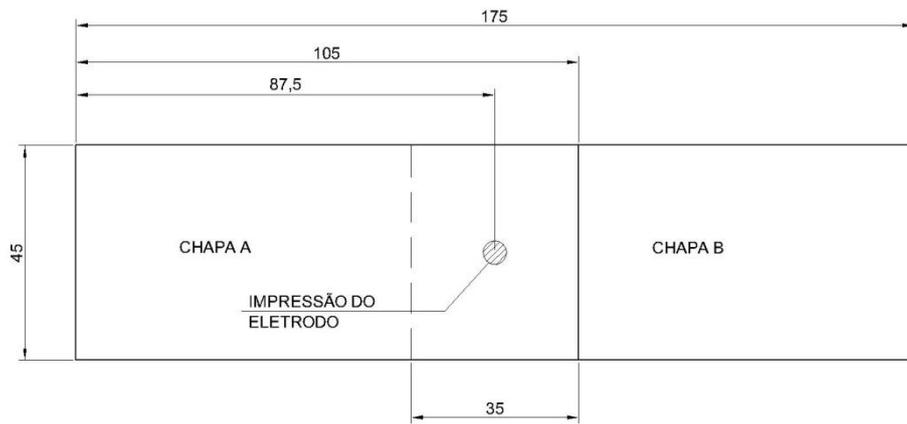


Figura 2.3.4.1 Dimensionamento do corpo de prova utilizado nos ensaios experimentais (dimensões em mm).

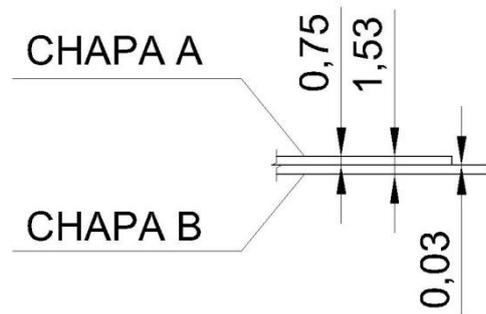


Figura 2.3.4.2 Vista lateral da chapa com espessura das chapas e posição de sobreposição (dimensões em mm).

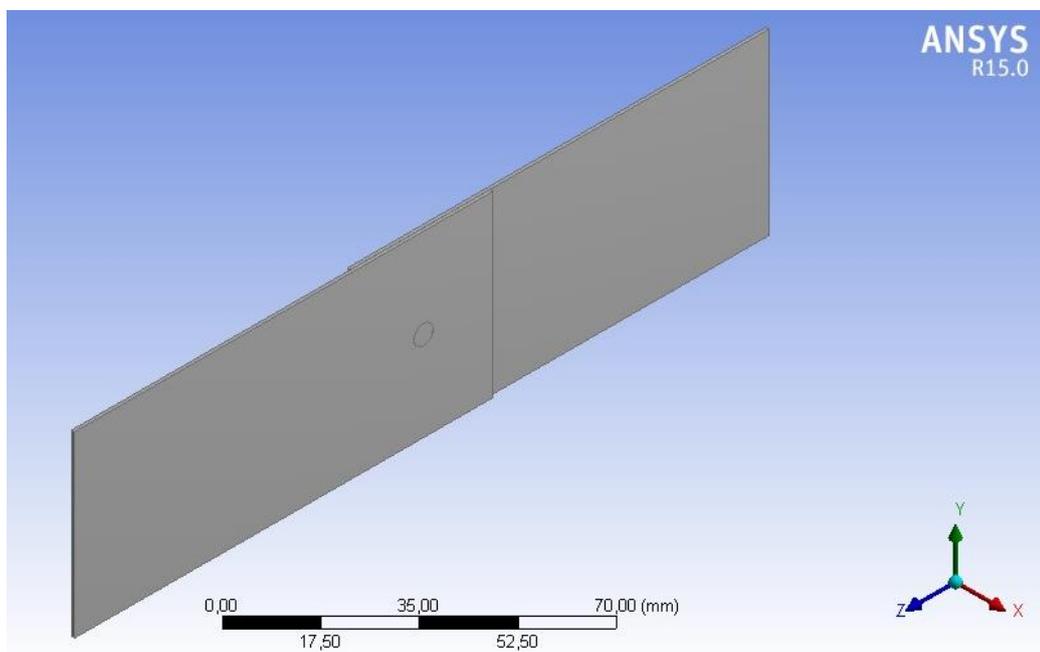


Figura 2.3.4.3 Modelo elaborado através do ANSYS® Workbench.

2.4 Estudo Térmico

Para o estudo térmico, foi considerada uma geometria onde o corpo está separado em duas chapas e possui em sua face de contato entre elas a geometria da lente formada que estão posicionadas a 0,01mm de distância uma da outra, conforme Figuras 2.4.1 e 2.4.2.

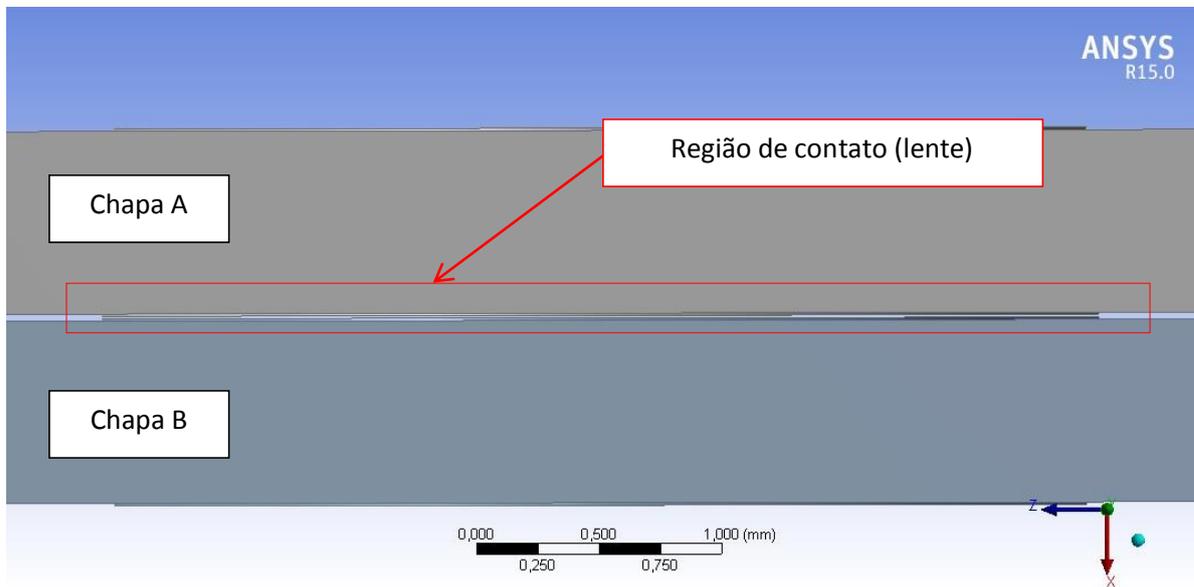


Figura 2.4.1 Vista lateral da região da lente.

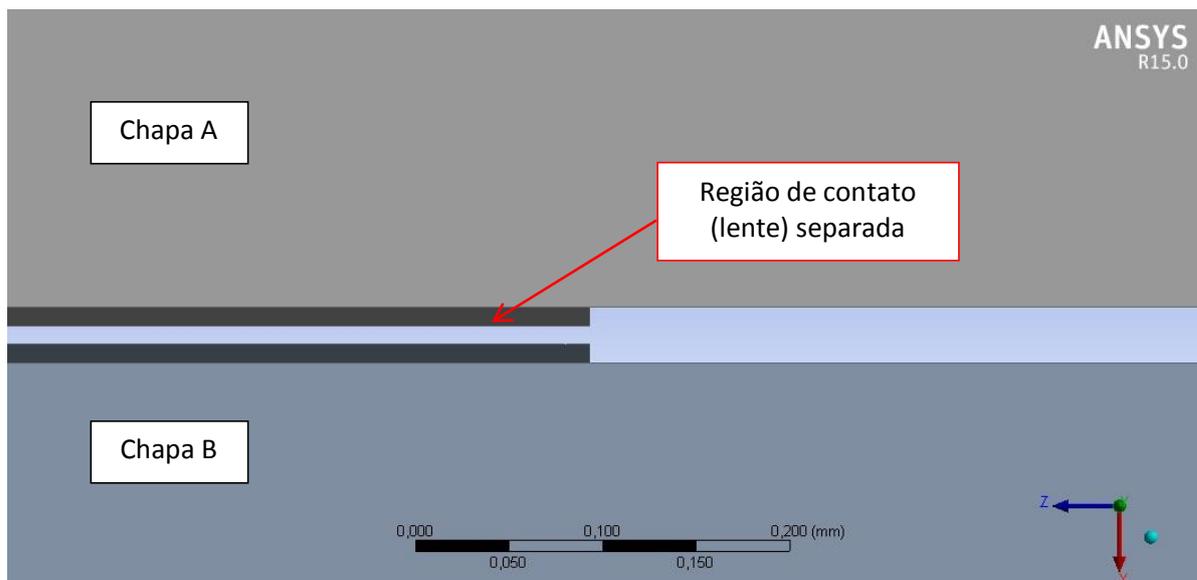


Figura 2.4.2 Vista lateral da região da lente.

Para Realização da simulação, foi considerado que a quantidade de calor gerada na Solda fosse dividida nas duas faces de contato da lente. O processo de soldagem demandaria de uma quantidade de calor equivalente a 420 W, 210W para cada face da lente. Conforme calculado anteriormente, a quantidade de calor gerada nos cálculos era de 460,8W portanto, parte desta quantidade de calor é perdida por fatores como: resfriamento do eletrodo, desgaste da ponta do eletrodo, entre outros. A Figura 2.4.3 mostra o local de aplicação.

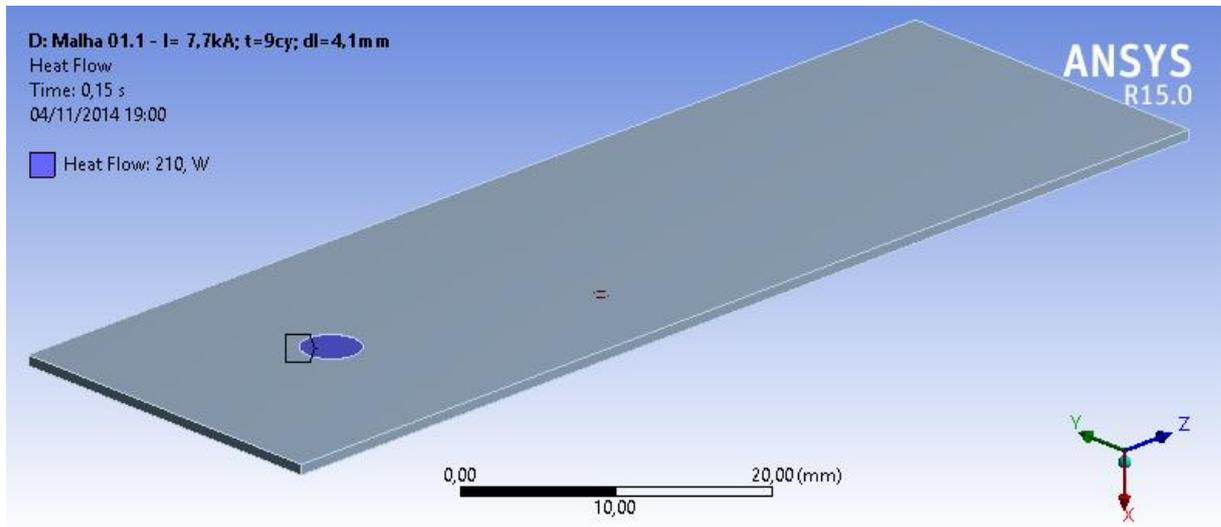


Figura 2.4.3 Local de aplicação da quantidade de calor.

2.4.1. Dados de simulação

Primeiramente, foi necessário analisar o comportamento da solda em relação ao tempo para definições de cálculo em regime permanente ou transiente. Este tópico demonstra o método que apresenta resultados mais próximos ao comportamento real.

As tabelas 6 e 7 descrevem os parâmetros adotados para execução da simulação térmica:

Tabela 6 Parâmetros de simulação

Parâmetros	Metodologia de Cálculo
Tempo de exposição	0,15s/ 9cy
Tempo de retenção	0,14s/ 8cy
Diâmetro da lente	4,1 mm
Área de aplicação da Quantidade de calor	13,2 mm ²
Quantidade de calor gerada	460W
Quantidade de calor efetivo	420W
Quantidade de calor dissipada	40W

Tabela 7 Tempo de passos

X'	Final do 1º passo	Resolução do 1º passo	Tempo mínimo de passo	Tempo máximo de passo
1	0,15 s	1,5e-003 s	1,5e-004 s	1,5e-002 s
2	0,29 s	1,4e-003 s	1,4e-004 s	1,4e-002 s

A temperatura de fusão do aço IF considerado neste estudo é de, aproximadamente, 1500°C, [3] com base nestes dados foi realizado o ajuste do modelo, para que este apresentasse características próximas ao comportamento real da soldagem. A Tabela 8 apresenta os valores de entrada e o resultado de temperatura máxima obtida na simulação e as Figura 2.4.1.1 e Figura 2.4.1.2 demonstram a faixa de valores de temperatura e sua distribuição pela peça nos métodos estudados.

O método em regime permanente (Thermal Steady State) não apresentou resultados desejáveis nas análises realizadas, atingindo temperatura máxima de 2600°C. Obedecendo as definições de parâmetros para este projeto, os resultados das simulações em regime permanente atingiram valores muito superiores ao esperado, conforme a Figura 2.4.1.1 apresenta.

Segundo a teoria de condução térmica apresentada, o propósito do estudo é demonstrar o gradiente de temperatura na região externa e interna da junta soldada. A condução pelo método transiente apresentou resultados mais favoráveis aos resultados dos modelos reais.

Tabela 8 Tabela de comparação de resultado dos métodos.

Dados	Metodologia de Cálculo	
	Transiente Térmico	Regime Estacionário
Quantidade de calor aplicada	420W	420W
Tempo	0,15s/ 9cy	0,15s/ 9cy
Área de aplicação	13,2 mm ²	13,2 mm ²
Temperatura máxima Obtida	1430°C	2600°C

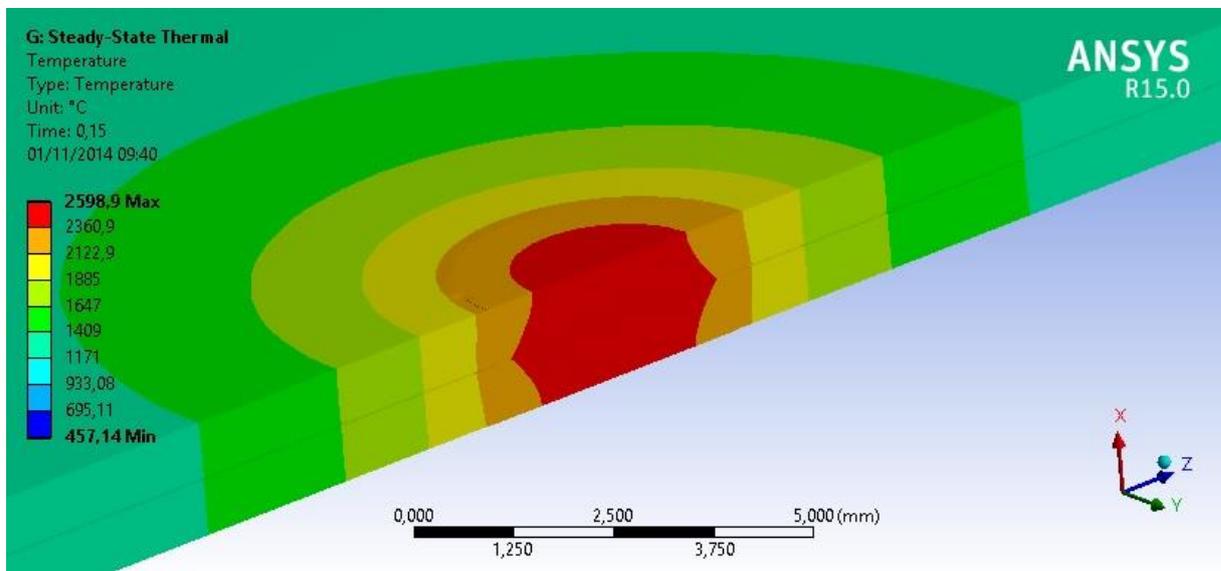


Figura 2.4.1.1 Gradiente de temperatura pelo método de estado de equilíbrio térmico

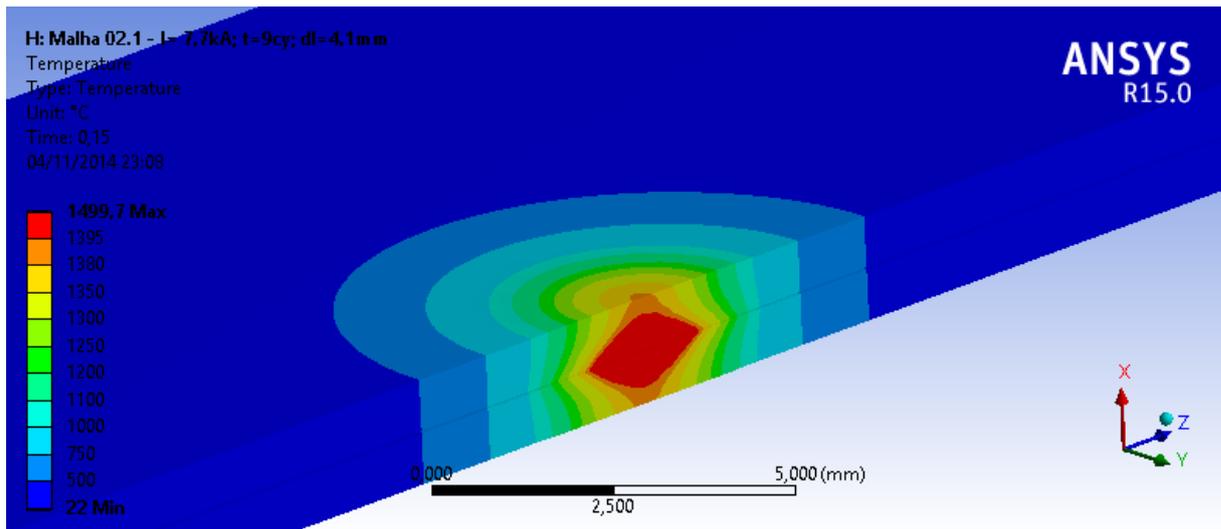


Figura 2.4.1.2 Gradiente de temperatura pelo método de transiente térmico.

Foi encontrado para análise térmica o valor temperatura próximo de 1500°C, enquanto que para o caso em regime permanente, a temperatura atingiu 2600°C. Conclui-se que o método mais próximo do comportamento real é o transiente térmico, por apresentar faixas de temperatura mais próximas do valor esperado. Portanto, o estudo não aceita cálculo em condições de regime permanente.

A metodologia para cálculo da condução de calor adotada foi em regime transiente térmico (transient thermal).

2.4.2. Estudo da malha

As etapas para se fazer uma malha de elementos finitos são:

- 1- Escolher os atributos dos elementos como: tipo de elemento, constantes reais, propriedades do material, etc
- 2 - Especificar os controles de malha como a densidade
- 3 - Salvar os dados antes de fazer a malha
- 4 - Gerar a malha

Para concepção de um modelo com resultados satisfatórios, foi realizado o trabalho de refinamento de malha pelo método ADPL. Foi definido após alguns testes que, para atender à necessidade, seria satisfatório a utilização de uma malha triangular, visto que este tipo de malha é o que melhor atende às especificidades do material do CP para os ensaios e carregamentos que seriam executados neste, inclusive pela sua microestrutura. Os resultados estão representados através das tabelas e das imagens capturadas das malhas projetadas ao modelo abaixo:

2.4.2.1. Malha 1.1;

A malha 1.1 foi a primeira malha gerada com parâmetros mais simples, conforme descrito na Tabelas 9.

Tabela 9 Parâmetros da Malha 1.1

Parâmetros da malha	
Tamanho de elemento	1 mm
Comprimento de pontos mínimo	0,75 mm
Suavização	Média
Tipo de elemento	Triangular
Nº de nós	21034
Elementos	9986

A figura 2.4.2.1 apresenta a vista isométrica da seção em corte da região da lente no modelo.

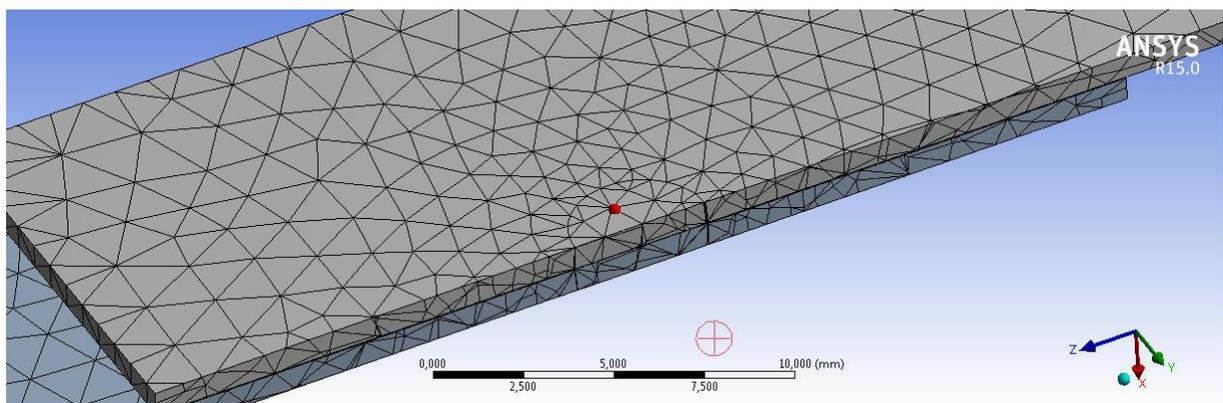


Figura 2.4.2.1 Malha 1.1 vista isométrica da lente.

A figura 2.4.2.2 apresenta a vista de topo do modelo, apresentando maior concentração de nós na região de contato do eletrodo.

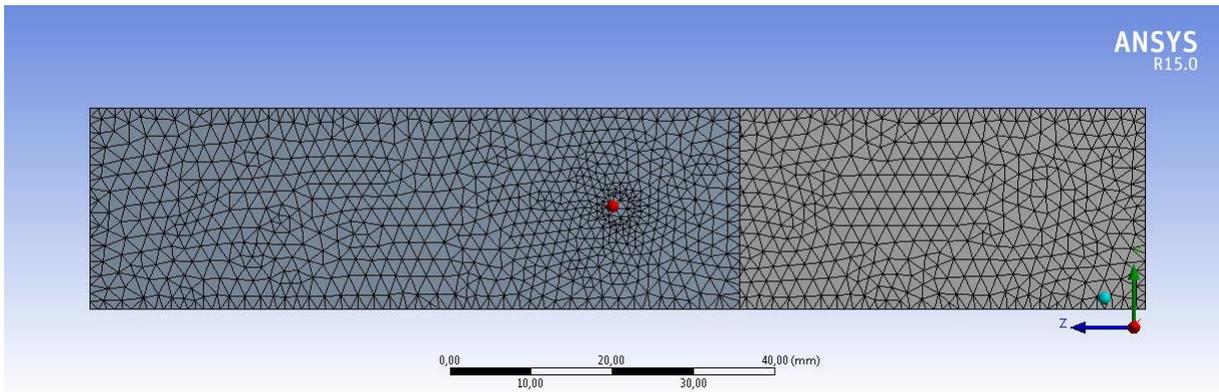


Figura 2.4.2.2 Malha 1.1 de topo do corpo de prova.

A figura 2.4.2.3 apresenta o corte da seção transversal da lente ao sentido de posicionamento dos eletrodos.

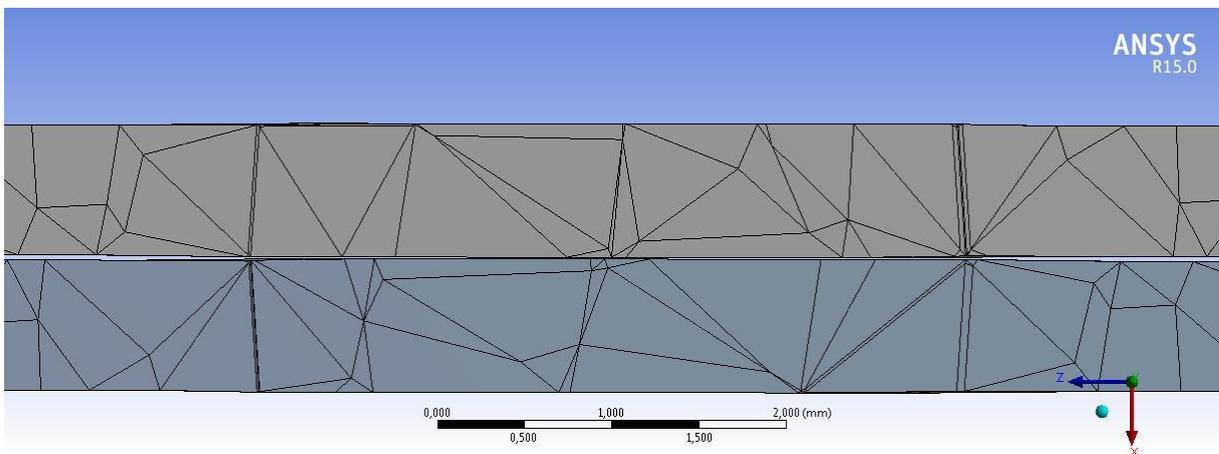


Figura 2.4.2.3 Malha 1.1 de corte da região da lente.

A figura 2.4.2.4 apresenta o corte da seção transversal da lente ao sentido de posicionamento dos eletrodos com os resultados de simulação.

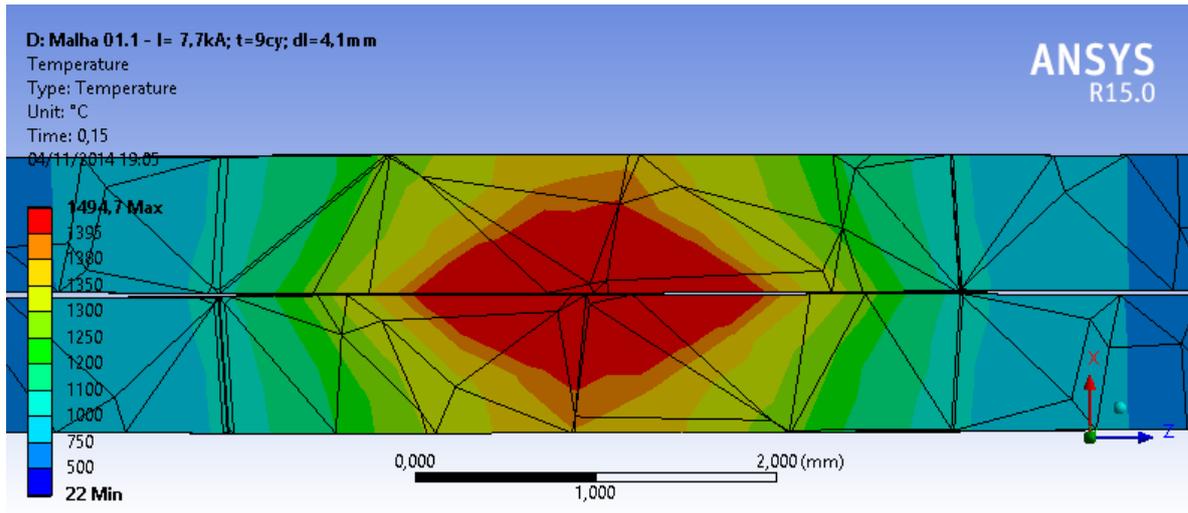


Figura 2.4.2.4 Resultado da malha 1.1 de corte da região da lente.

Nesta primeira Análise o modelo apresentou temperatura máxima de 1494,7°C e a região da lente aparentou distorcida com diâmetro de lente médio de 2mm devido ao tamanho grosseiro da malha.

2.4.2.2. Malha 1.2;

Na malha 1.2 foi utilizada a base da malha 1.1 com refinamento local da região de formação da lente de 0,2 mm, conforme descrito na Tabela 10.

Tabela 10 Parâmetros da Malha 1.2

Parâmetros da malha	
Tamanho de Elemento	1 mm
Comprimento de pontos mínimo	0,75 mm
Suavização	Média
Tipo de elemento	Triangular
Nº de nós	44241
Qtd. De Elementos	23283
Refinamento local	
Tamanho de Elemento	0,2 mm
Comportamento	Suave

A figura 2.4.2.5 apresenta a vista isométrica da seção em corte da região da lente no modelo.

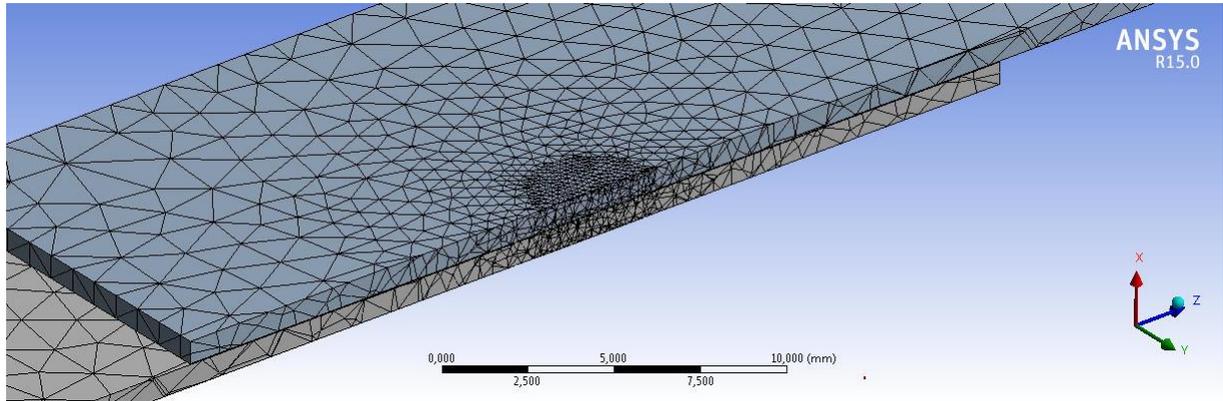


Figura 2.4.2.5 Malha 1.2 vista isométrica da lente.

A figura 2.4.2.6 apresenta a vista de topo do modelo, apresentando maior concentração de nós na região de contato do eletrodo.

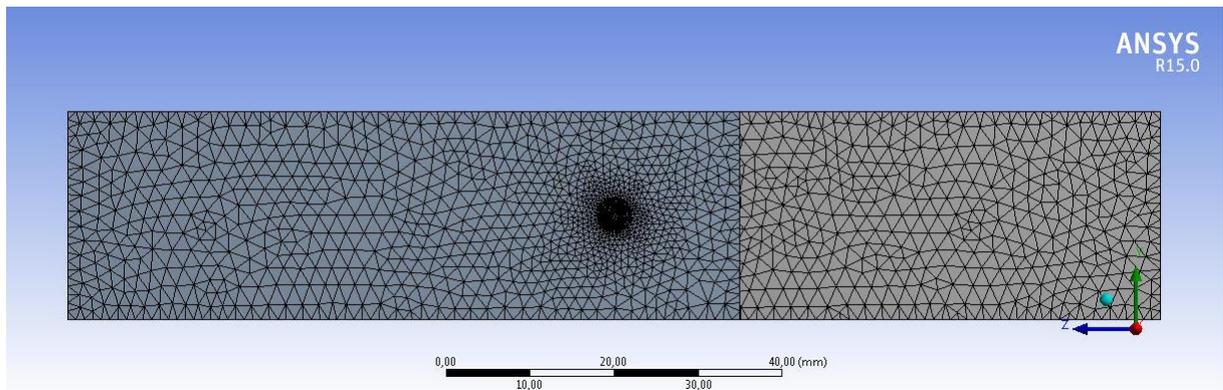


Figura 2.4.2.6 Malha 1.2 de topo do corpo de prova.

A figura 2.4.2.7 apresenta o corte da seção transversal da lente ao sentido de posicionamento dos eletrodos.

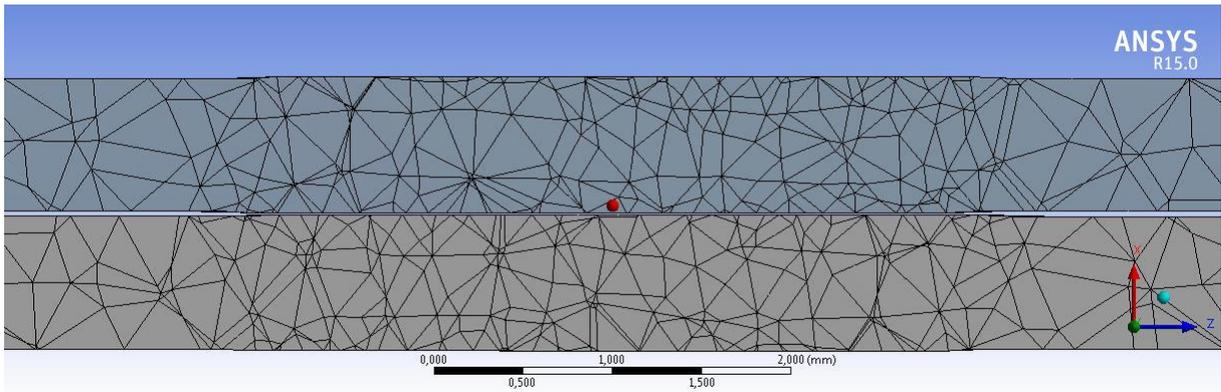


Figura 2.4.2.7 Malha 1.2 de corte da região da lente.

A figura 2.4.2.8 apresenta o corte da seção transversal da lente ao sentido de posicionamento dos eletrodos com os resultados de simulação.

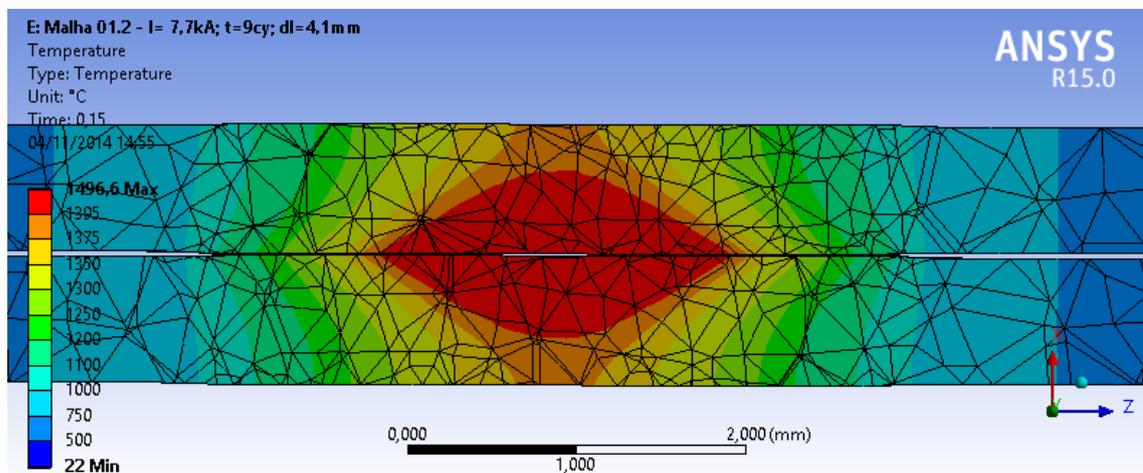


Figura 2.4.2.8 Resultado da malha 1.2 de corte da região da lente.

No modelo de malha 1.2 , foi apresentado resultados muito próximo ao modelo 1.1 com temperatura máxima de 1496°C e na região da lente foi obtido uma aparência com transições mais suaves e diâmetro de lente médio de 2mm.

2.4.2.3. Malha 1.3;

Na malha 1.3 foi utilizada a base da malha 1.1 com refinamento local da região de formação da lente de 0,1 mm, conforme descrito na Tabela 11.

Tabela 11 Parâmetros da Malha 1.3

Parâmetros da malha	
Tamanho de Elemento	1 mm
Comprimento de pontos mínimo	0,75 mm
Suavização	Média
Tipo de elemento	Triangular
Nº de nós	87572
Qtd. De Elementos	49025
Refinamento local	
Tamanho de Elemento	0,1 mm
Comportamento	Suave

A figura 2.4.2.9 apresenta a vista isométrica da seção em corte da região da lente no modelo.

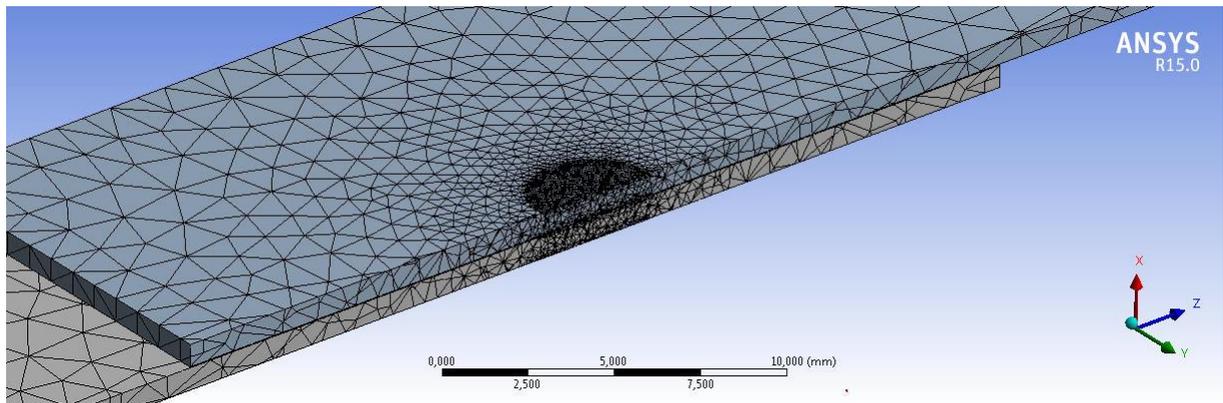


Figura 2.4.2.9 Malha 1.3 vista isométrica da lente.

A figura 2.4.2.10 apresenta a vista de topo do modelo, apresentando maior concentração de nós na região de contato do eletrodo.

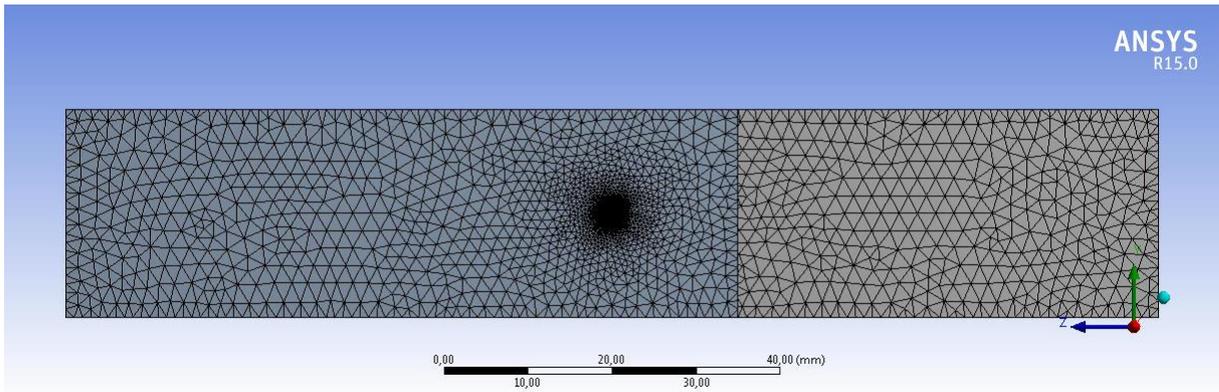


Figura 2.4.2.10 Malha 1.3 de topo do corpo de prova.

A figura 2.4.2.11 apresenta o corte da seção transversal da lente ao sentido de posicionamento dos eletrodos.

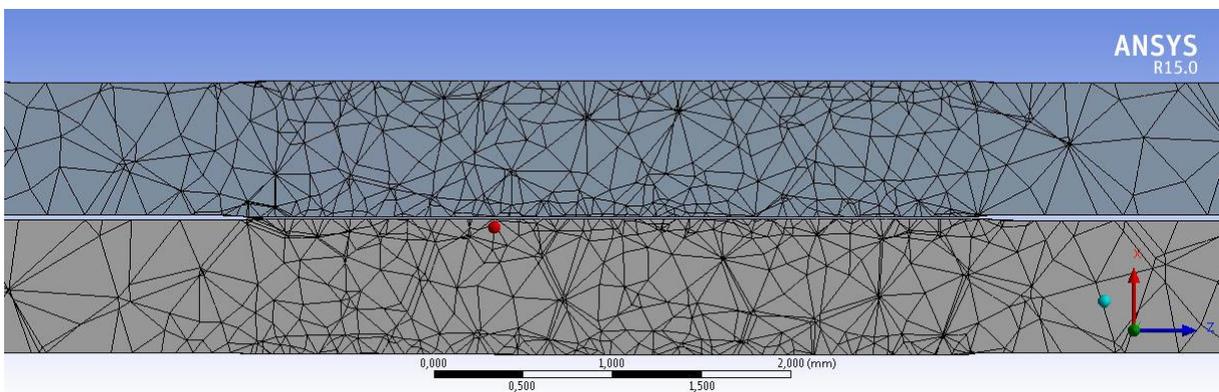


Figura 2.4.2.11 Malha 1.3 de corte da região da lente.

A figura 2.4.2.12 apresenta o corte da seção transversal da lente ao sentido de posicionamento dos eletrodos com os resultados de simulação.

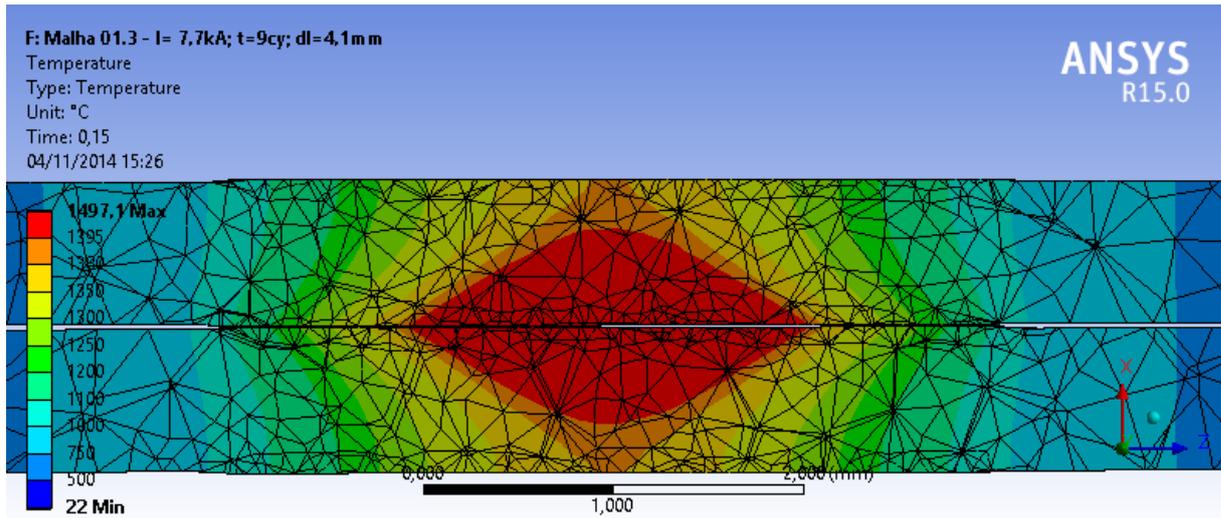


Figura 2.4.2.12 Resultado da malha 1.3 de corte da região da lente.

No modelo de malha 1.3 , foi apresentado resultados muito próximo ao modelo 1.2 com temperatura máxima de 1497,1°C e na região da lente foi obtido uma aparência com transições suaves aparência e diâmetro de lente médio de 2mm.

2.4.2.4. Malha 2.1;

Na malha 2.1 foi elaborada com refinamento da malha 1.1, sem refinamento local , conforme descrito na Tabela 12.

Tabela 12 Parâmetros da Malha 2.1

Parâmetros da malha	
Tamanho de Elemento	0,250 mm
Comprimento de pontos mínimo	0,75 mm
Suavização	Média
Tipo de elemento	Triangular
Nº de nós	348785
Qtd. De Elementos	196572

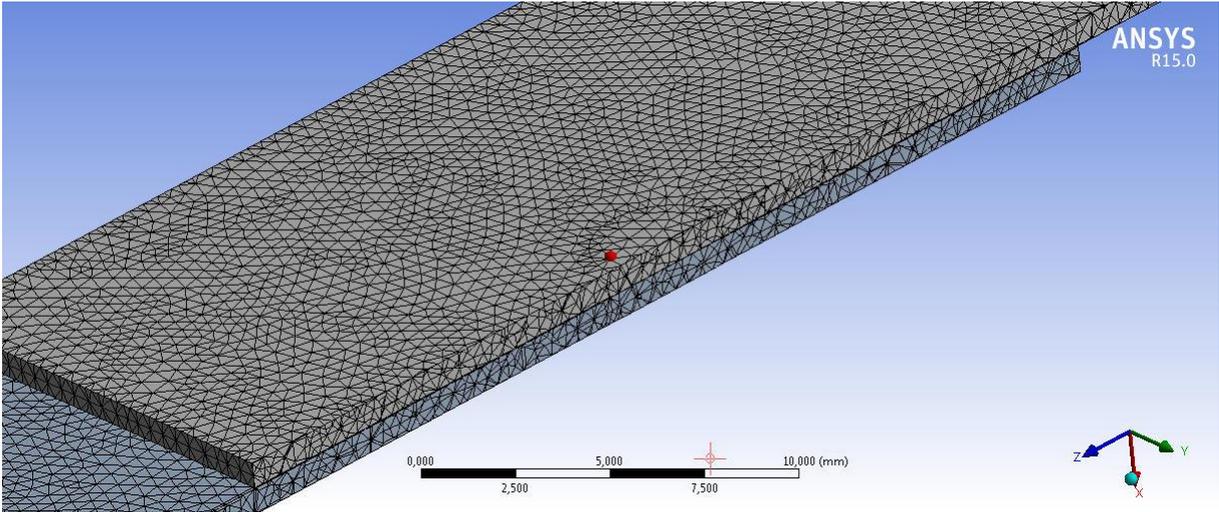


Figura 2.4.2.13 Malha 2.1 vista isométrica da lente

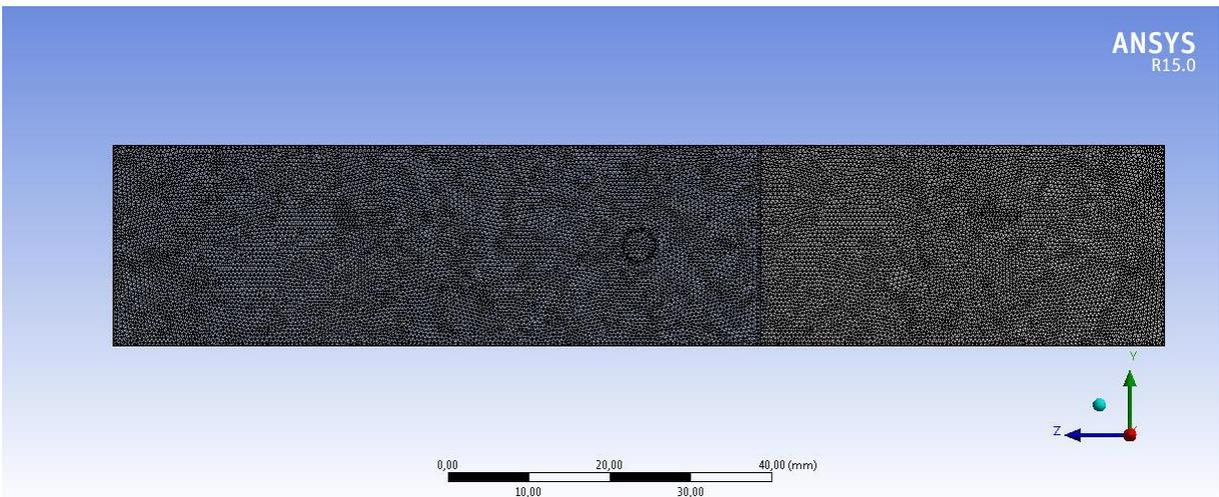


Figura 2.4.2.14 Malha 2.1 de topo do corpo de prova.

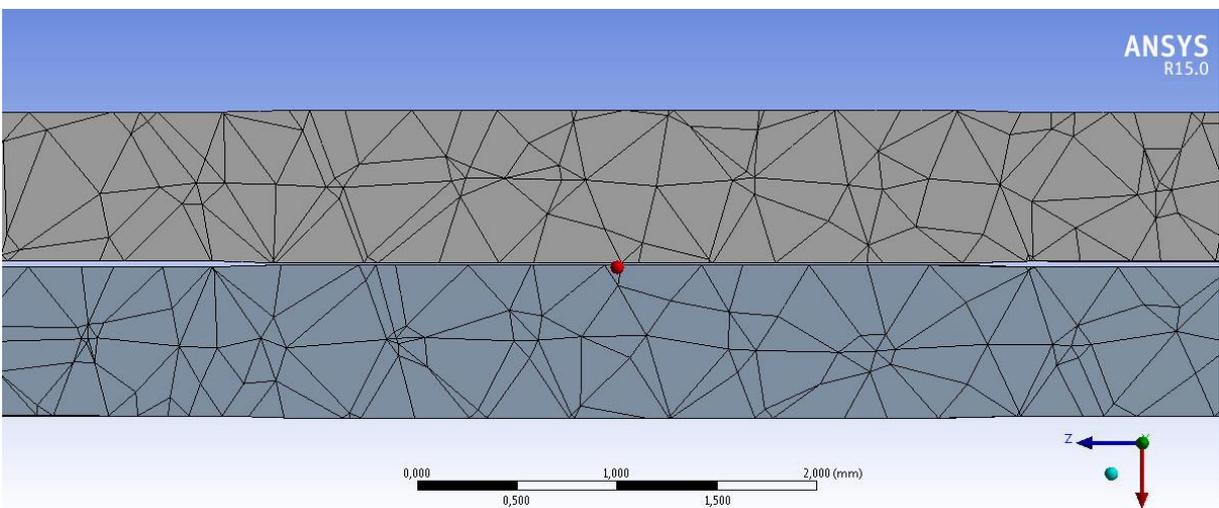


Figura 2.4.2.15 Malha 2.1 de corte da região da lente.

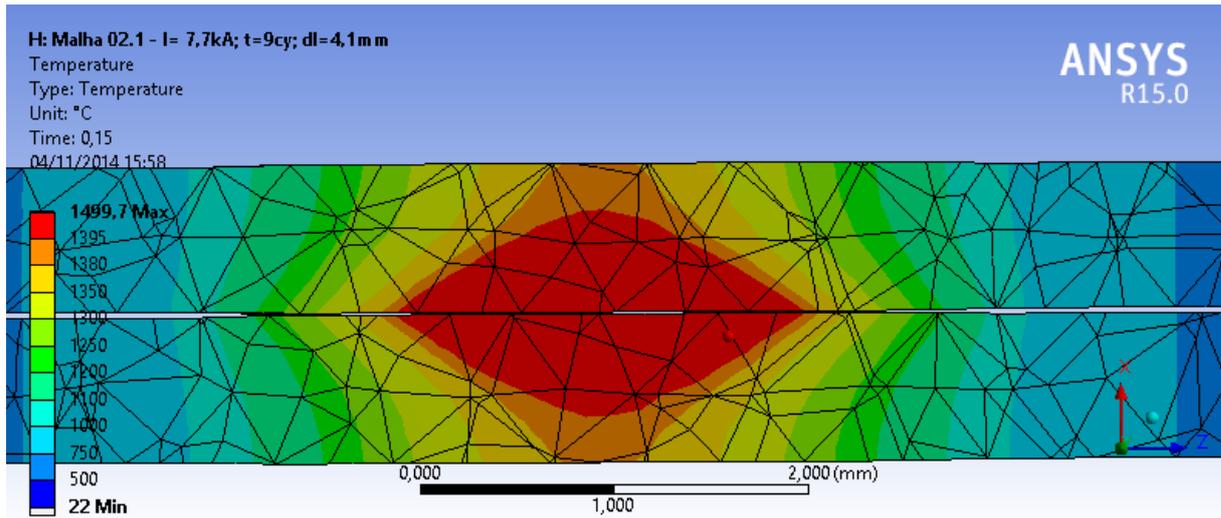


Figura 2.4.2.16 Resultado da malha 2.1 de corte da região da lente.

No modelo de malha 2.1 , foi apresentado resultados muito próximo aos modelos 1.1 , 1.2 e 1.3 com temperatura máxima de 1499,7°C e na região da lente foi obtido uma aparência com transições suaves e diâmetro da lente médio de 2mm.

2.4.2.5. Malha 2.2;

Na malha 2.2 foi utilizada a base da malha 2.1 com refinamento local da região de formação da lente de 0,1 mm, conforme descrito na Tabela 13.

Tabela 13 Parâmetros da Malha 2.2

Parâmetros da malha	
Tamanho de Elemento	0,25 mm
Comprimento de pontos mínimo	0,75 mm
Suavização	Média
Tipo de elemento	Triangular
Nº de nós	483536
Qtd. De Elementos	274148
Refinamento local	
Tamanho de Elemento	0,1 mm
Comportamento	Suave

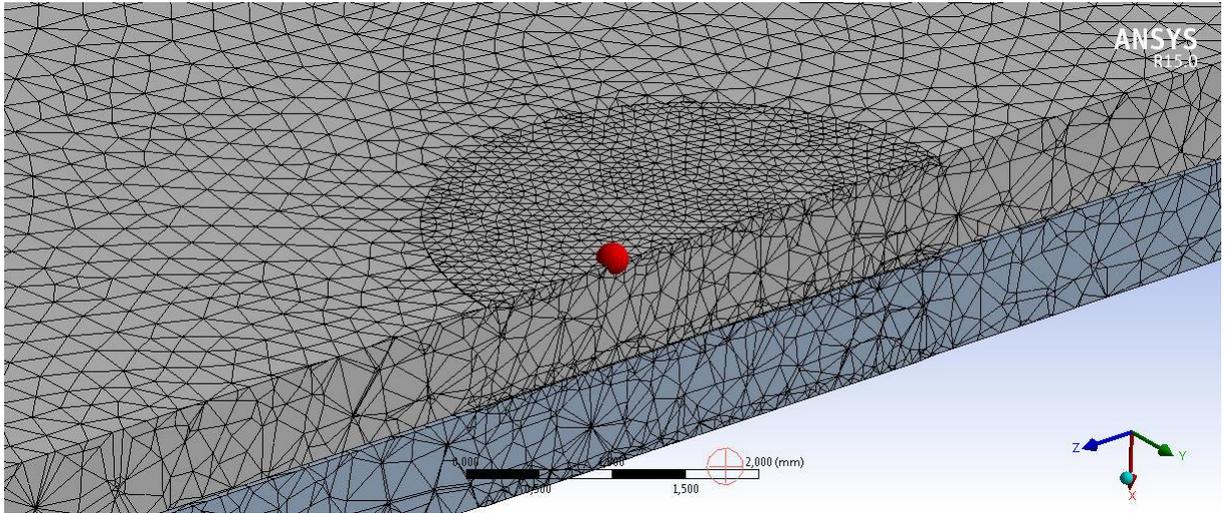


Figura 2.4.2.17 Malha 2.2 vista isométrica da lente

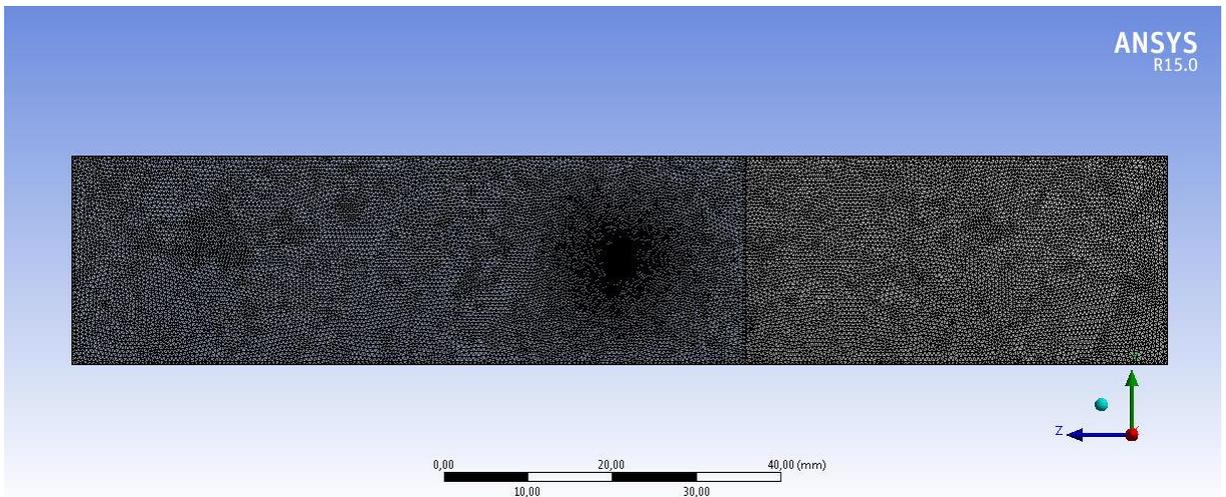


Figura 2.4.2.18 Malha 2.2 de topo do corpo de prova.

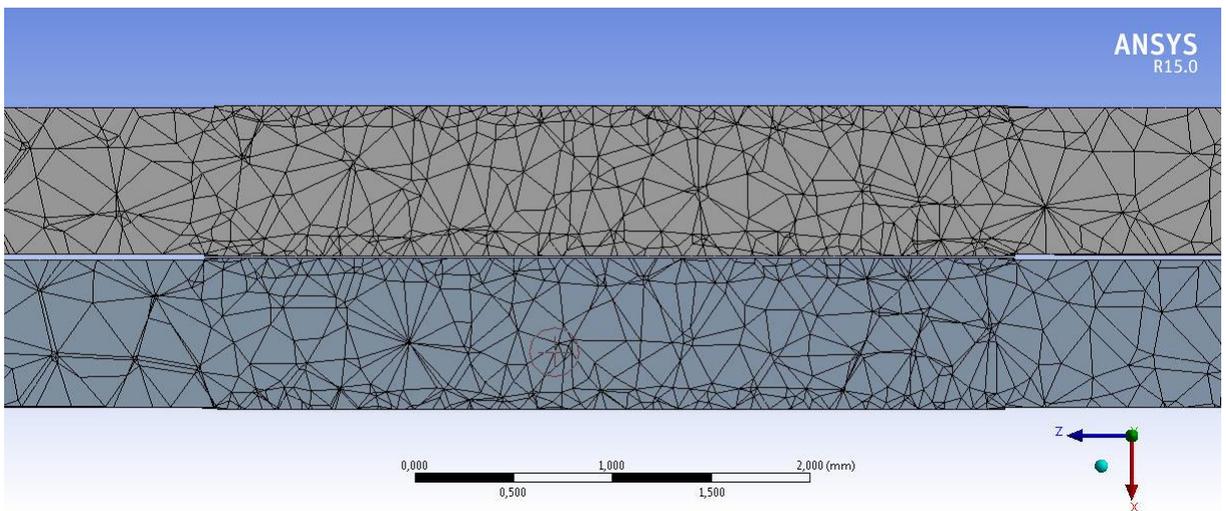


Figura 2.4.2.19 Malha 2.2 de corte da região da lente.

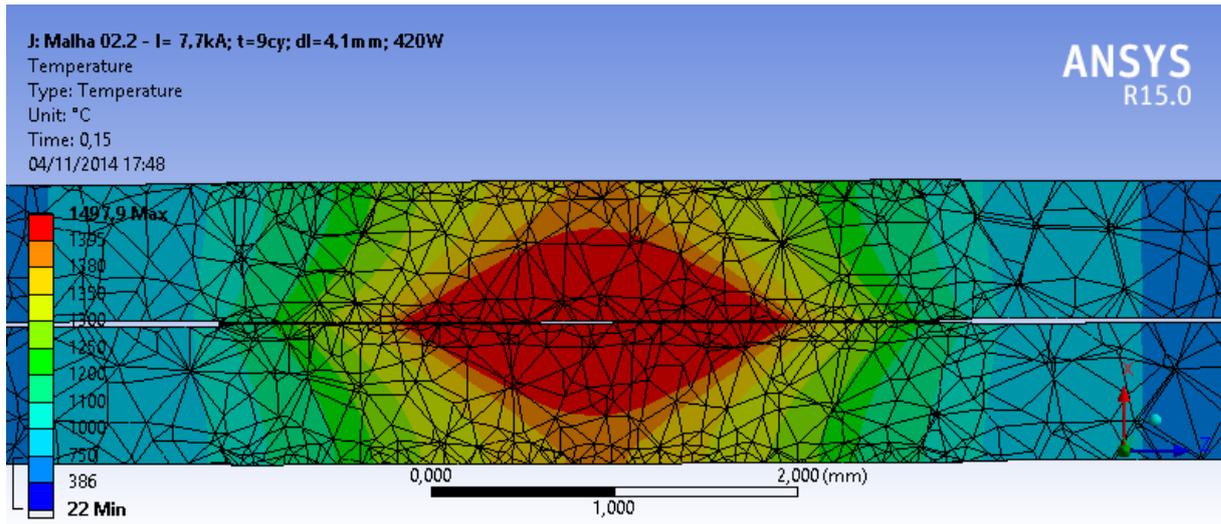


Figura 2.4.2.20 Resultado da malha 2.1 de corte da região da lente.

No modelo de malha 2.2, foi observado que o resultado se encontrou próximo dos outros resultados, porém ocorreu decréscimo do valor da temperatura máxima, que atingiu o valor de 1497,9°C e na região da lente foi obtido uma aparência com transições mais suaves aparência com diâmetro médio de 2mm.

2.4.3. Análise de convergência

Os resultados das simulações térmicas utilizando as malhas acima apresentaram valores máximos semelhantes, porém sem o fornecimento de suavização na impressão dos resultados com as malhas mais grosseiras. É possível visualizar que os modelos com menor quantidade de elementos apresentam resultados com gradiente de temperatura menos suavizado.

O gráfico da Figura 2.4.3.1 apresenta a análise de convergência dos resultados conforme refinamento da malha do modelo.

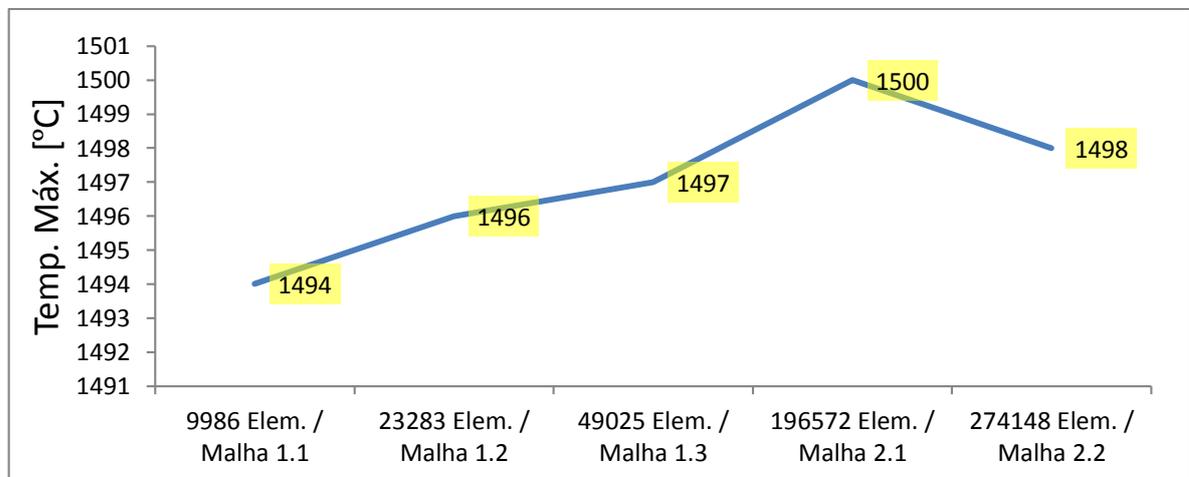


Figura 2.4.3.1 Gráfico de análise de convergência.

Pode-se considerar que os modelos apresentados apresentam erro menor que 0,4%, podendo ser considerados os resultados obtidos através dos modelos estudados como plausíveis para este estudo e assim percebe-se a malha 2.1 como a mais adequada ao estudo proposto.

2.4.4. Resultados

As imagens descrevem os resultados obtidos internamente na região central da formação da lente Figura 2.4.4.1 e superficial da chapa (Figura 2.4.4.2), bem como a variação da temperatura pela no seu estado de temperatura máxima com tempo determinado no final do 1º passo, onde $t = 0,15s$.

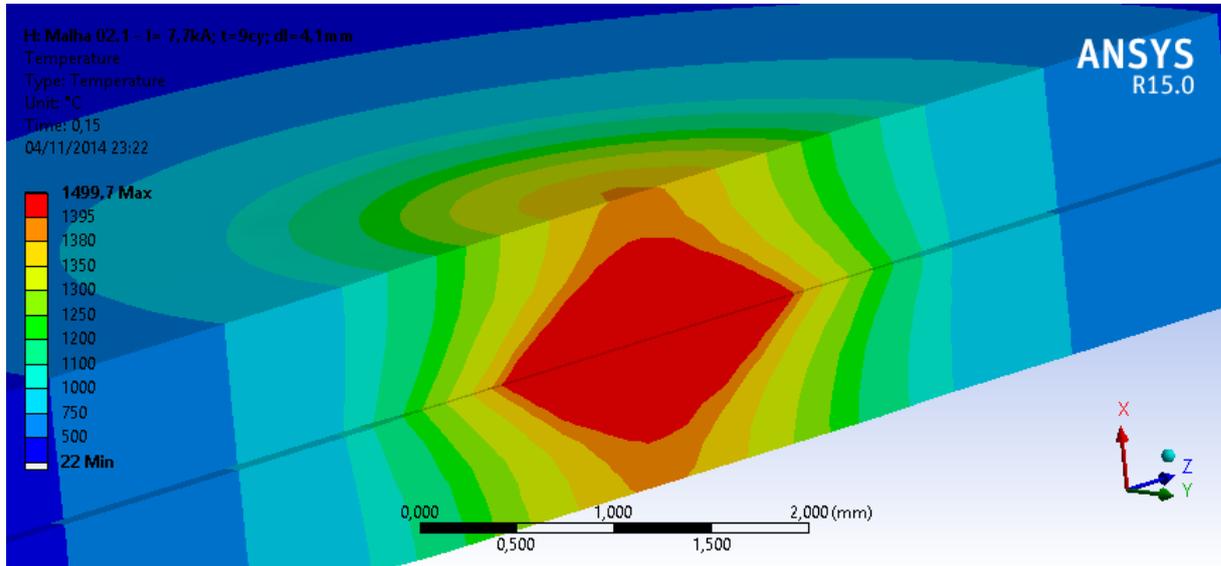


Figura 2.4.4.1 Vista isométrica do resultado do gradiente de temperatura;

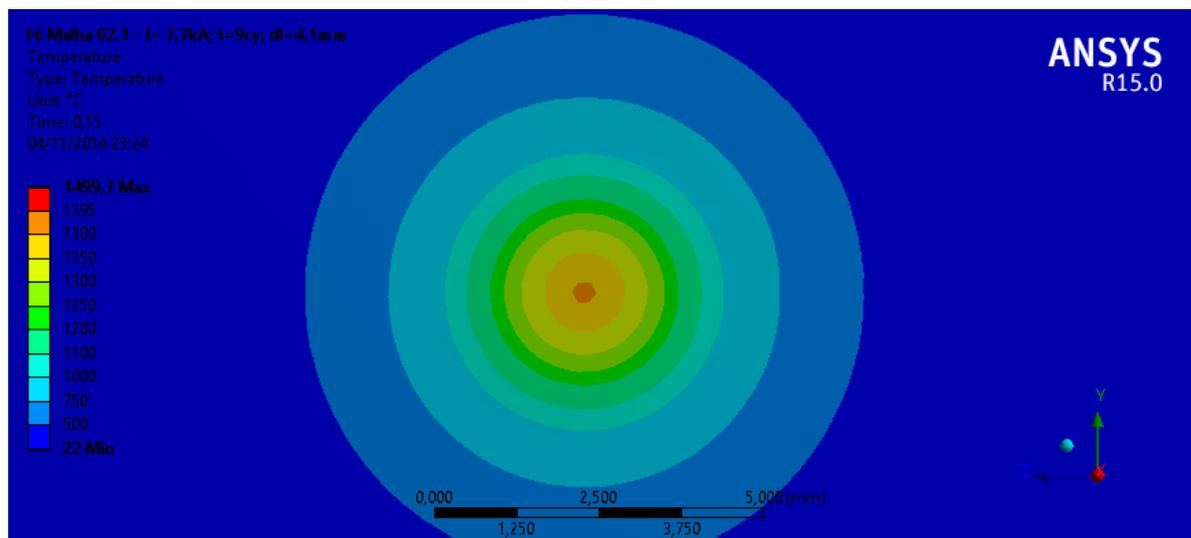


Figura 2.4.4.2 Vista da face da região soldada do resultado do gradiente de temperatura;

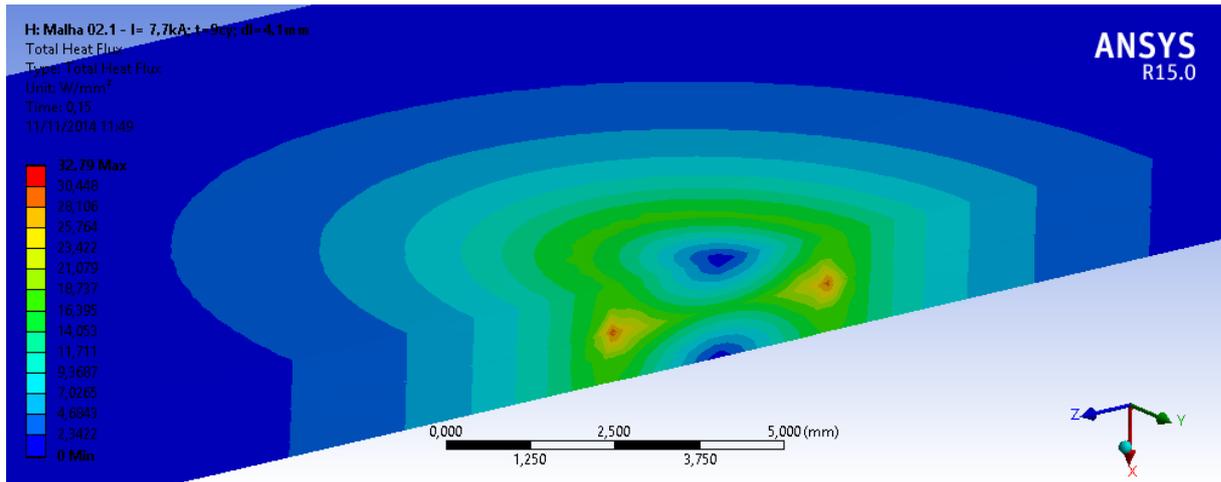


Figura 2.4.4.3 Vista da face da região soldada do resultado do fluxo de calor;

Os gráficos da Figura 2.4.4.4 e Figura 2.4.4.5 abaixo e Tabela 14 apresentam os resultados da simulação da variação da temperatura máxima em relação ao tempo e do fluxo de calor em relação ao tempo.

No gráfico 2.4.4.4 o instante $t = 0s$ à $t = 0,15s$ está submetido a um fornecimento de calor constante de $410W$ e apresentando uma curva de temperatura com formato semi-parabólico alcançando valor final de aproximado de $1500^{\circ}C$. Após o instante $t = 0,15s$ a quantidade de calor é cessada linearmente até o instante $t = 0,29s$, resultando em uma curva semi-parabólica tendendo a uma reta.

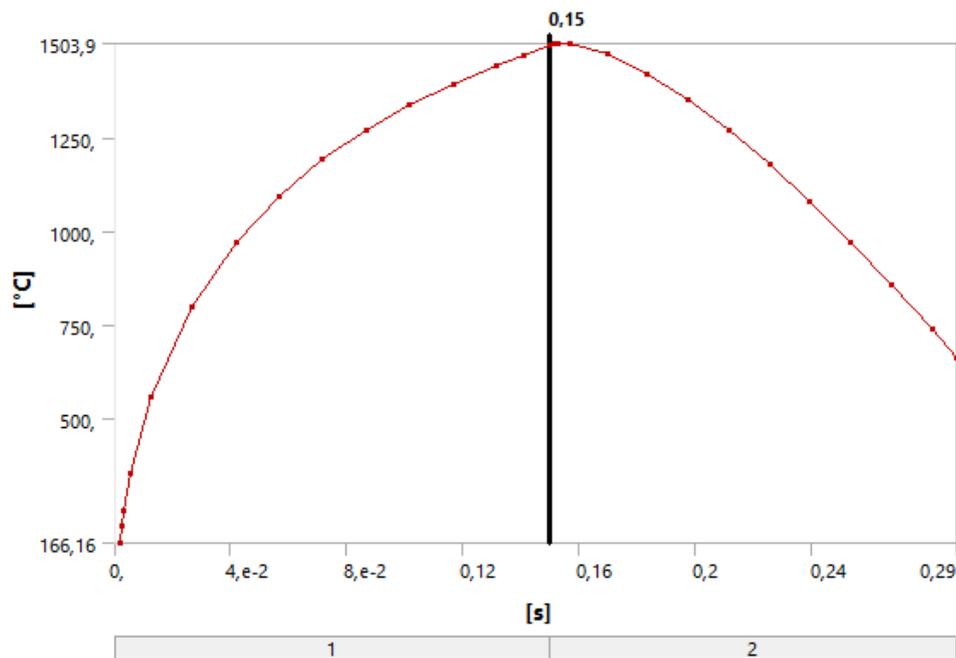


Figura 2.4.4.4 Gráfico de variação de temperatura máxima pelo tempo;

Da mesma forma o gráfico 2.4.4.5 no instante $t = 0s$ à $t = 0,15s$ apresenta o fluxo de calor com curva logarítmica. Após o instante $t = 0,15s$ o decréscimo do fluxo de calor ocorre de forma muito próxima ao decréscimo de calor gerada no tempo de retenção.

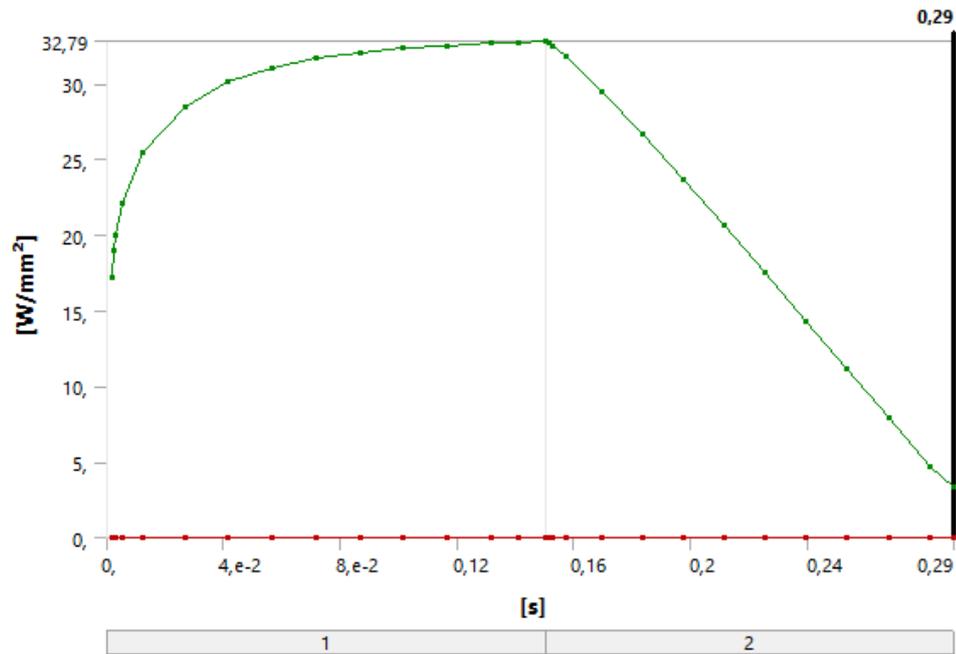


Figura 2.4.4.5 Gráfico de variação do fluxo de calor máxima pelo tempo;

Tabela 14 Tempo/temperatura máxima/ fluxo de calor;

Tempo [s]	Temp. Max. [°C]	Fluxo de calor [W/mm²]
0,0015	166,16	17,133
0,002283	213,76	18,913
0,0030659	254,58	20,01
0,0054148	354,52	22,078
0,012462	557,03	25,395
0,026577	799,43	28,441
0,041577	970,85	30,099
0,056577	1096	31,046
0,071577	1193,4	31,635
0,086577	1272,5	32,028
0,10158	1338,7	32,302
0,11658	1395,6	32,501
0,13158	1445,3	32,65
0,14079	1473,5	32,726
0,15	1499,7	32,79
0,1514	1502,2	32,636
0,1528	1503,9	32,454
0,157		31,801
0,1696	1476	29,451
0,1836	1422,8	26,607
0,1976	1353,7	23,634
0,2116	1272,1	20,579
0,2256	1180,4	17,469
0,2396	1080,1	14,318
0,2536	972,35	11,136
0,2676	858,06	7,9333
0,2816	737,89	4,723
0,29	663,77	3,3635

Considerando que a presente simulação não considerou o esforço do eletrodo sobre a região da solda, conforme o processo de soldagem a ponto real, a lente apresentou diâmetro médio de 2mm na temperatura de fusão do aço. Entretanto a pressão sobre o material à temperatura de fusão, causa esmagamento da região de aço em estado líquido, provocando maior deformação a quente do aço para o redor da solda, proporcionando uma região fundida maior, com dimensão aproximada de 4mm de diâmetro.

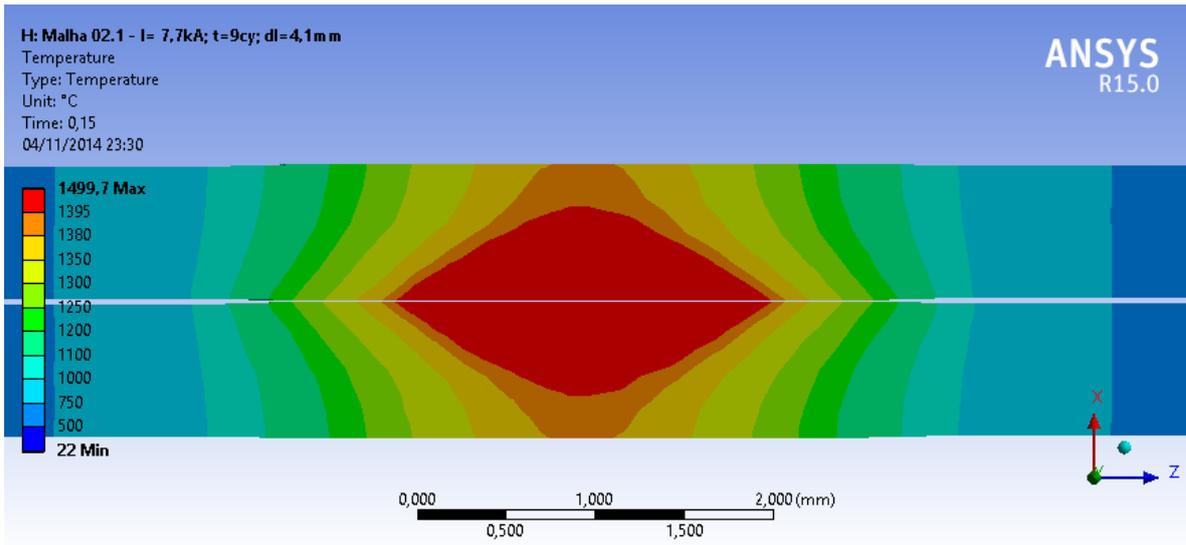


Figura 2.4.4.6 Solução com comprimento da lente;

A imagem abaixo apresenta o resultado real da soldagem real, que pode ser comparado com o modelo analisado nas simulações.

Tendo em vista que no modelo numérico apresentado não é considera esforço do eletrodo, presença de eletrodo com resfriamento, os resultados distam no quesito de o dimensionamento da lente não serem semelhantes.

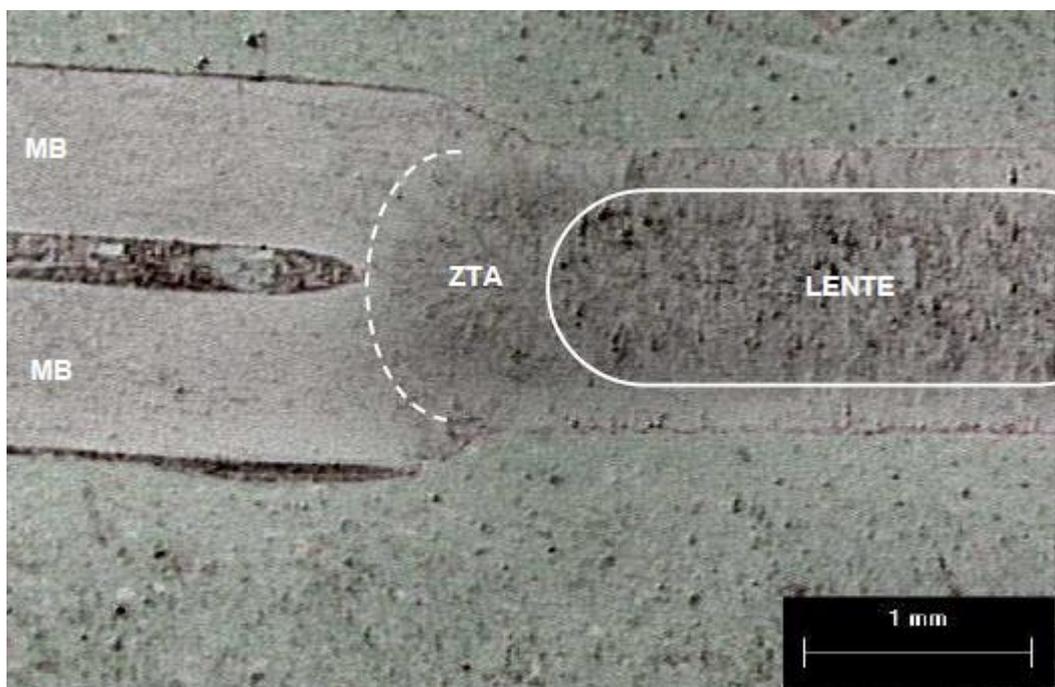


Figura 2.4.4.7 Microscopia da secção transversal de uma solda a ponto por resistência [3];

A figura Figura 2.4.4.8 apresenta o resultado da simulação com a concepção da malha sobreposta, para melhor visualização das periferias e transição.

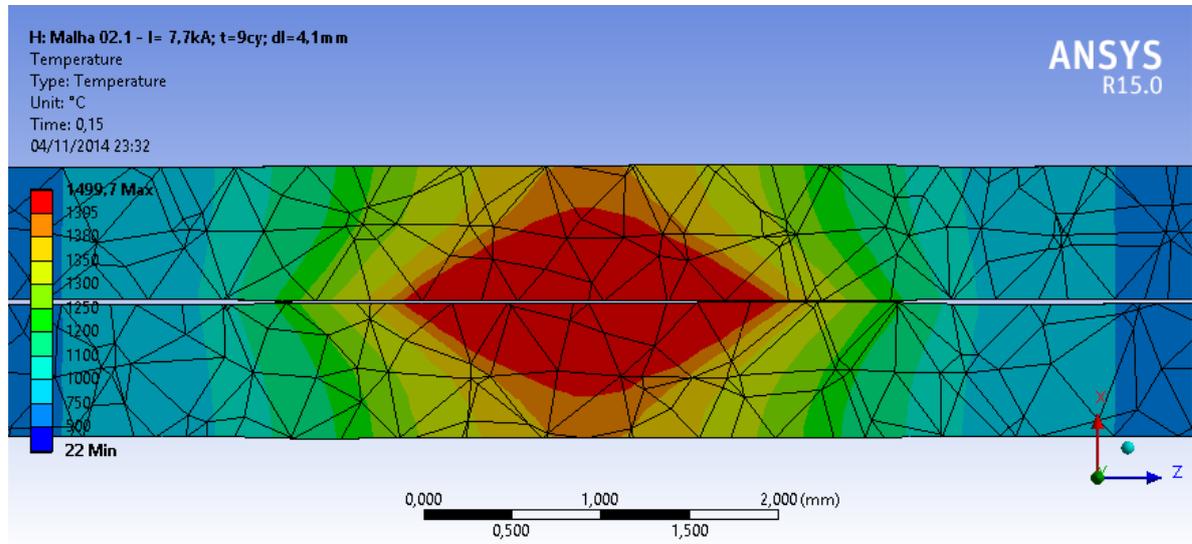


Figura 2.4.4.8 Solução com comprimento da lente com malha aparente;

A Figura 2.4.4.9 apresenta a solda em corte paralelo a disposição da chapa.

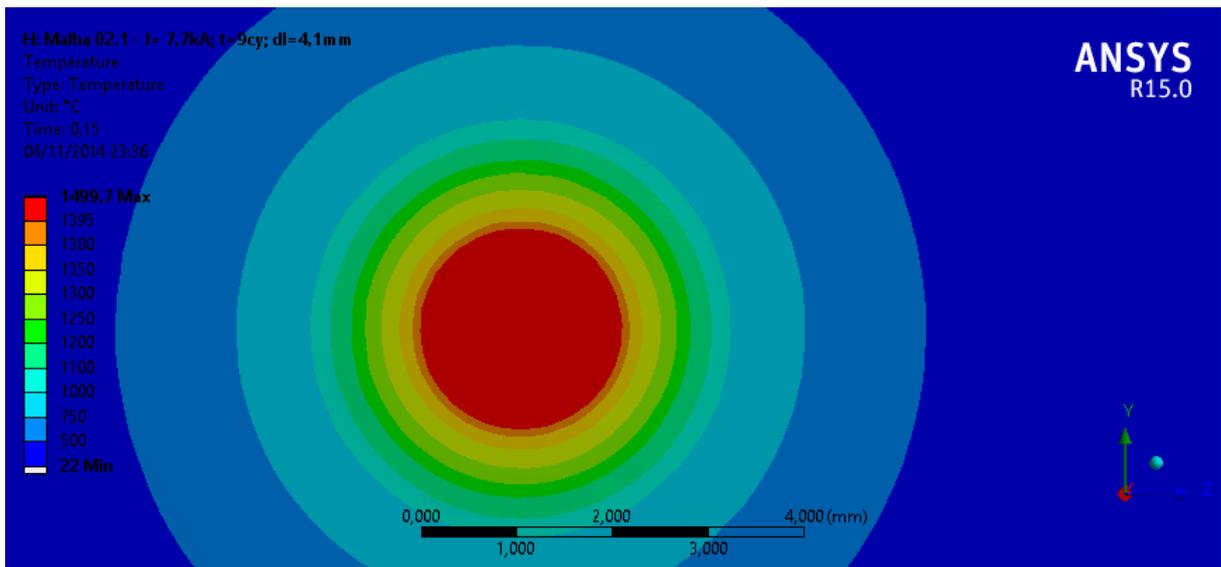


Figura 2.4.4.9 Corte perpendicular a direção da solda;

2.5 Estudo de Ensaio de Cisalhamento

Para o ensaio de cisalhamento foi analisado o estudo estrutural estático (static structural) em regime permanente e estrutural em regime transiente (transiente structural).

O emprego dos métodos de cálculo em conformação plástica tem por objetivo determinar os esforços, tensões e deformações a que estão submetidas a peça conformada e as ferramentas afim de:

- Prever possíveis falhas durante o processamento tais como: imperfeições de escoamento, acúmulo de tensões em regiões críticas, defeitos nos produtos;
- Definir o tipo e a capacidade dos equipamentos a empregar;
- Definir o número de etapas necessárias ao processamento de uma dada peça metálica.

2.5.1. Geometria do modelo

Para equilíbrio dos esforços sobre a solda, foi necessário ajustar a geometria do modelo para o ensaio de tracionamento das chapas. A figura abaixo apresenta a alteração da geometria com um ressalto em 0,78mm na ponta das chapas para equilibrar a espessura da outra chapa soldada mais a distancia entre elas. O desenho na Figura 2.5.1.1 Figura 2.5.1.2 representa o esquema realizado.

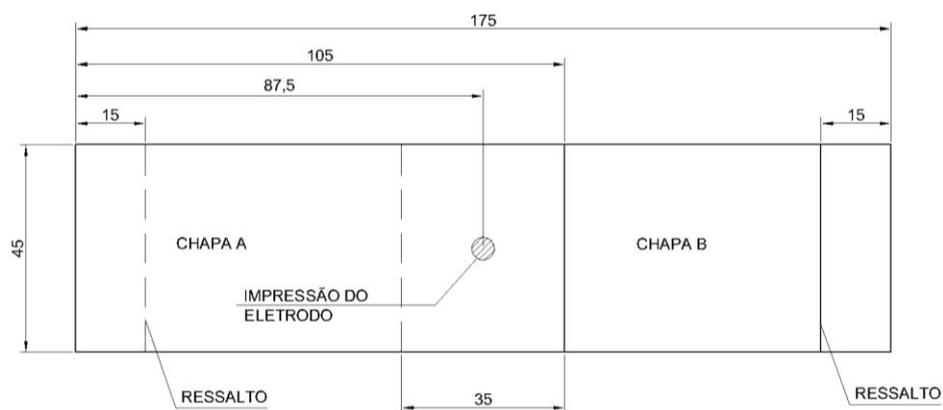


Figura 2.5.1.1 Geometria do modelo de ensaio de cisalhamento

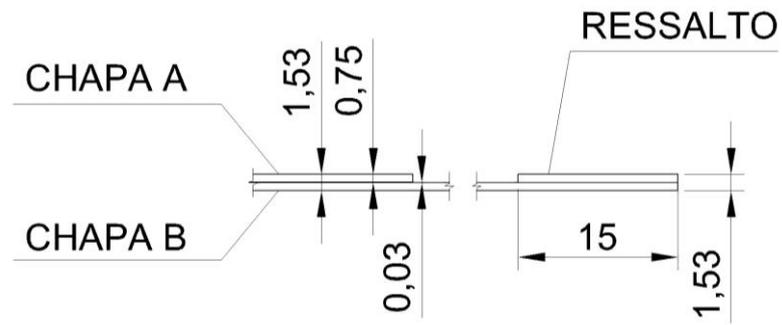


Figura 2.5.1.2 Espessura da geometria do modelo de ensaio de cisalhamento.

A aplicação do carregamento foi dividida e distribuída nas áreas das faces opostas nas extremidades conforme a Figura 2.5.1.3 e a tabela 15 indica os parâmetros adotados:

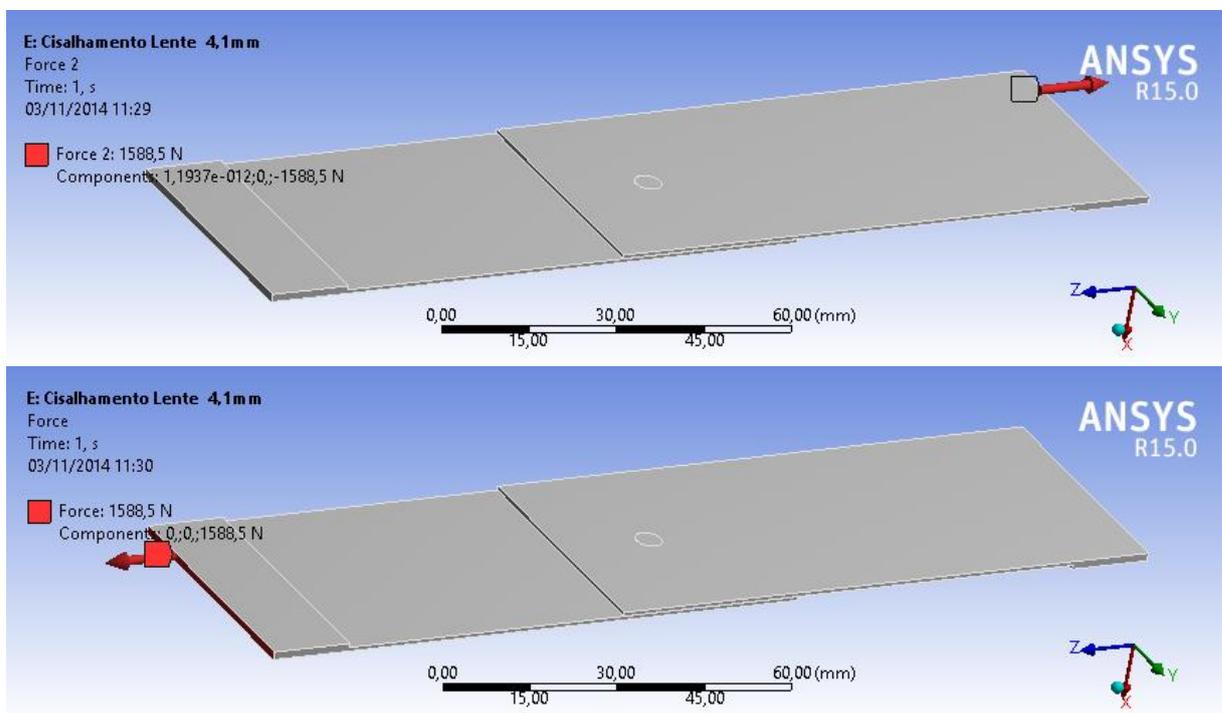


Figura 2.5.1.3 Aplicação do carregamento.

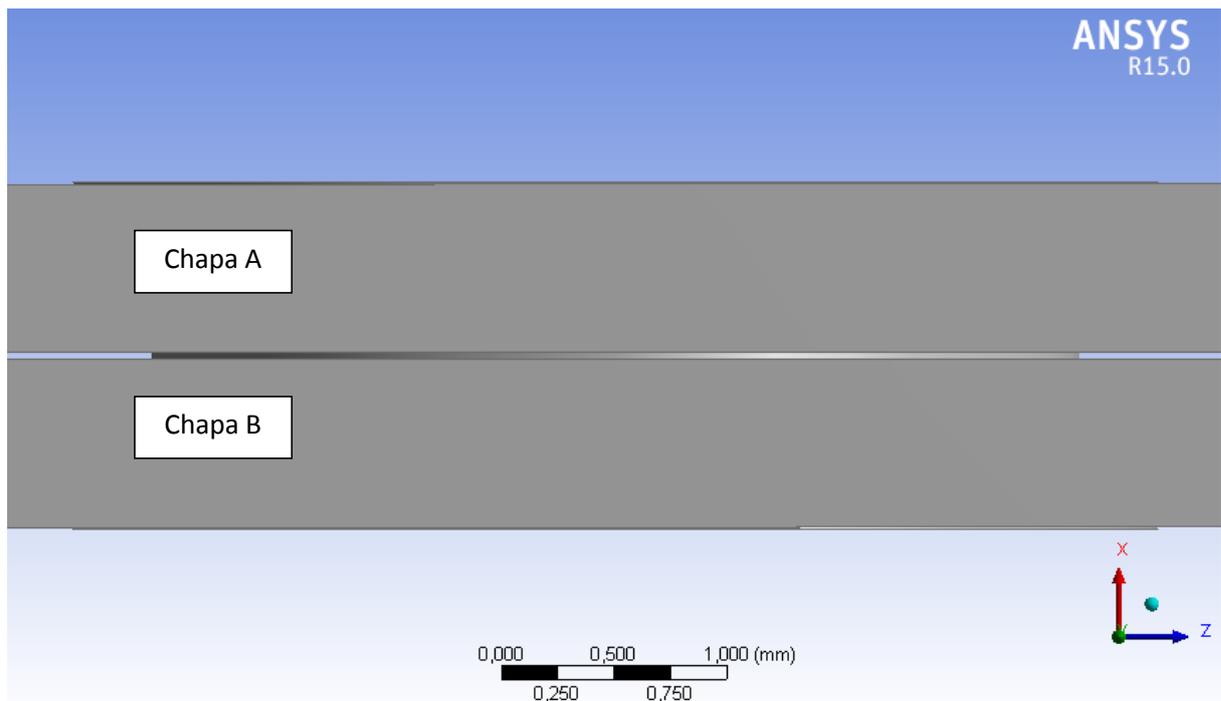
A tabela 16 indica os parâmetros adotados para realização da simulação em regime permanente:

Tabela 15 - Parâmetros de simulação estática

Parâmetros	Metodologia de Cálculo
Tempo de exposição	1 s
Carga aplicada	2 x 1588,5 N
Diâmetro da lente	4,1 mm
Área da lente	13,2 mm ²

2.5.2. Estudo Estático

Para o estudo de ensaio de cisalhamento, foi utilizado o método estático estrutural, sendo consideradas as chapas como um corpo fundido pela região da lente conforme o diâmetro obtido pela soldagem. As Figuras 2.5.21.1 e Figura 2.5.21.2 mostram a geometria final para os ensaios de cisalhamento da solda.

**Figura 2.5.2.1** Vista lateral da região da lente unida.

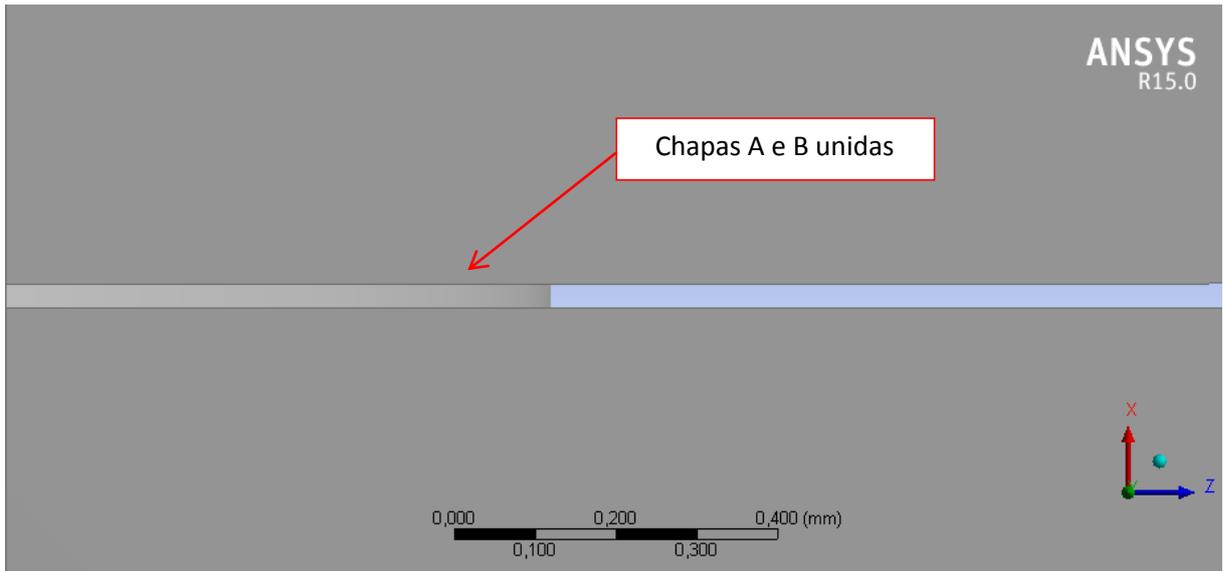


Figura 2.5.2.2 Vista lateral da região da lente unida.

2.5.3. Dados de simulação

Na concepção da análise de tensões foi utilizado o critério de tensão máxima (critério de Tresca) devido as resultantes de tensões corresponderem a valores mais próximos ao comportamento real. De forma que se fosse analisado pelo critério de Von Mises as tensões resultantes apresentariam valores extremamente altos, por este ser um método conservativo. [12]

A Tabela 16 demonstra os valores de carga aplicada e tensão resultante máxima sobre a peça nas primeiras simulações de teste. A seguir, as Figura 2.5.3.1, 2.5.3.2 e 2.5.3.3 apresentam os gradientes de tensões máxima e equivalente apresentados nas simulações:

Tabela 16 - Valores de carga aplicada e tensão resultante máxima

Dados	Metodologia de Cálculo	
	Estrutural Transiente	Estrutural Estático
Carga Total Aplicada	3177 N	3177 N
Tensão máxima (Tresca)	659,23 MPa	660,55 MPa
Tensão equivalente(Von Mises)	-	1125 MPa

A figura 2.5.3.1 apresenta o resultado da simulação de cisalhamento ao regime permanente pelo critério de tensão máxima (Tresca).

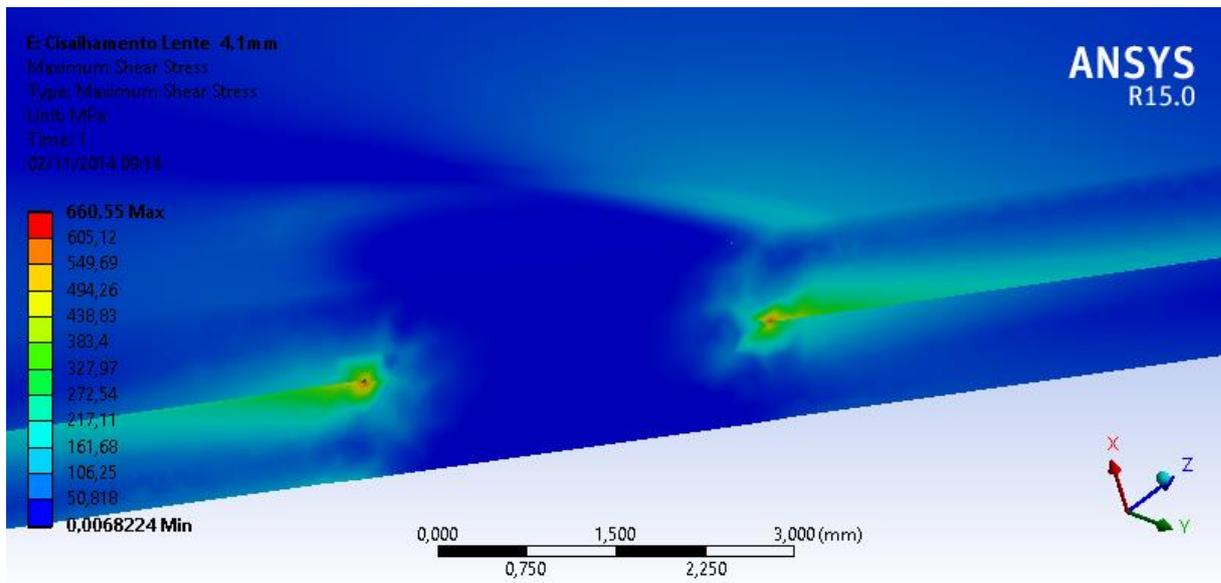


Figura 2.5.3.1 Gradiente de tensões máximas pelo método estrutural estático.

A figura 2.5.3.2 apresenta o resultado da simulação de cisalhamento ao regime transiente pelo critério de tensão máxima (Tresca).

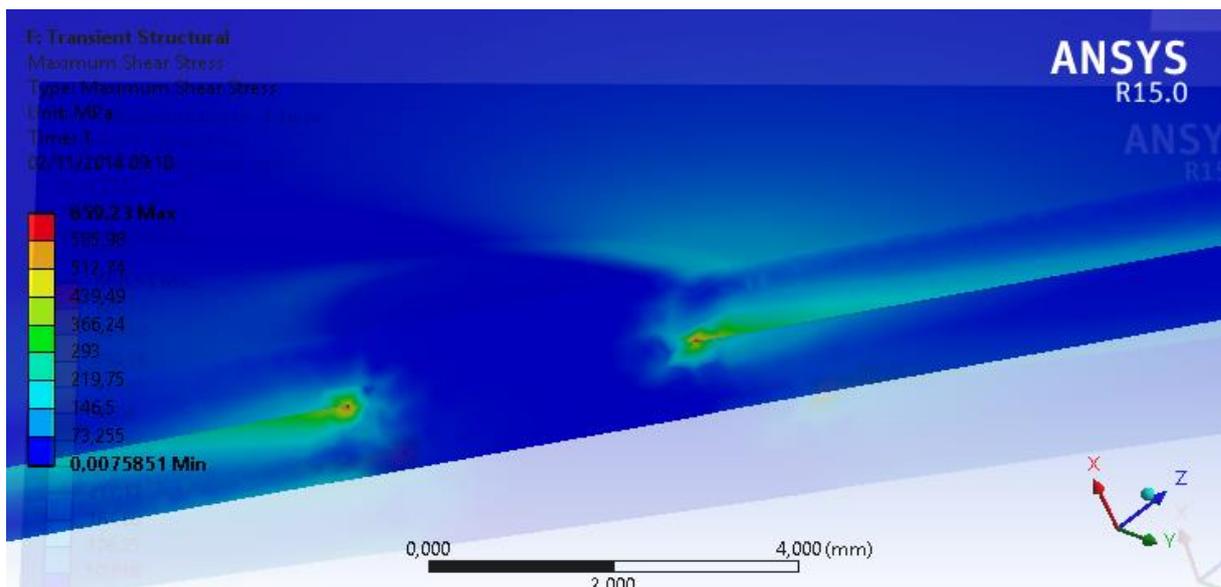


Figura 2.5.3.2 Gradiente de tensões máximas pelo método estrutural transiente.

A figura 2.5.3.3 apresenta o resultado da simulação de cisalhamento ao regime permanente pelo critério de tensão equivalente (Von mises).

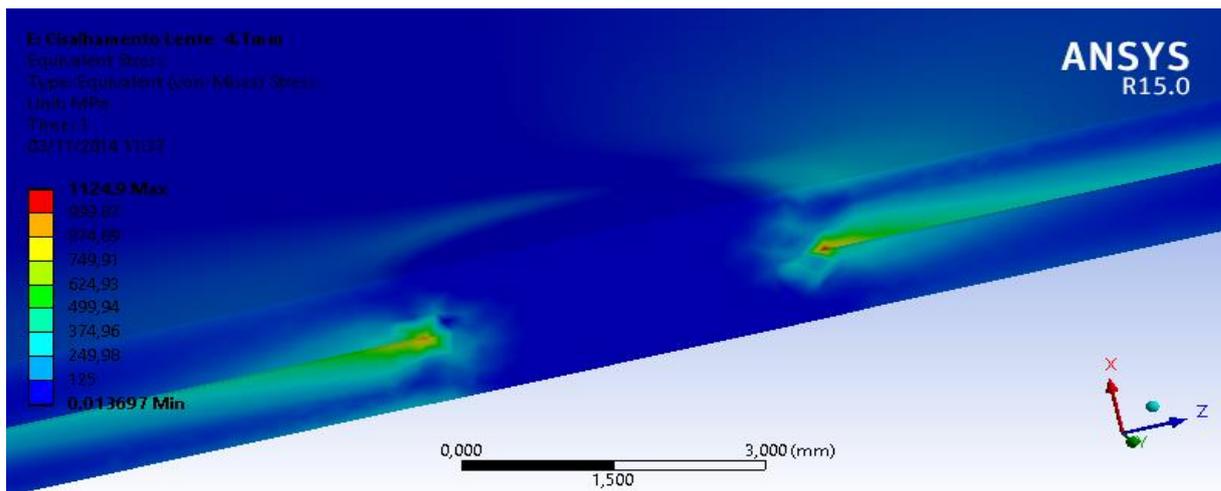


Figura 2.5.3.3 Gradiente de tensões equivalente pelo método estrutural estático

Devido ao comportamento mecânico de cálculos de tensões não serem alteradas pela variável “tempo”, os resultados em regime estático e transiente apresentaram valores equivalentes. Portanto para validação dos resultados, foi adotado o sistema como regime permanente pelo critério de Tresca para simulação do ensaio de cisalhamento.

2.5.4. Estudo da malha

Para concepção de um modelo com resultados satisfatório, foi realizado o trabalho de refinamento de malha pelo método ADPL. Foi definido após alguns testes que, para atender à necessidade, seria satisfatório a utilização de uma malha triangular, visto que este tipo de malha é o que melhor atende às especificidades do material do CP para os ensaios e carregamentos que seriam executados neste, inclusive pela sua microestrutura. Os resultados estão representados através das tabelas e das imagens capturadas das malhas projetadas ao modelo abaixo:

2.5.4.1. Malha 1.1;

A malha 1.1 foi a primeira malha gerada com parâmetros mais simples, conforme descrito na Tabela 17.

Tabela 17 Parâmetros da Malha 1.1

Parâmetros da malha	
Tamanho de elementos	0,2 à 0,5 mm
Menor comprimento de arestas	0,75 mm
Suavização	Alta
Tipo de elemento	Triangular
Nº de nós	965080
Elementos	596880

A figura 2.5.4.1 apresenta a vista isométrica da seção em corte da região da lente no modelo.

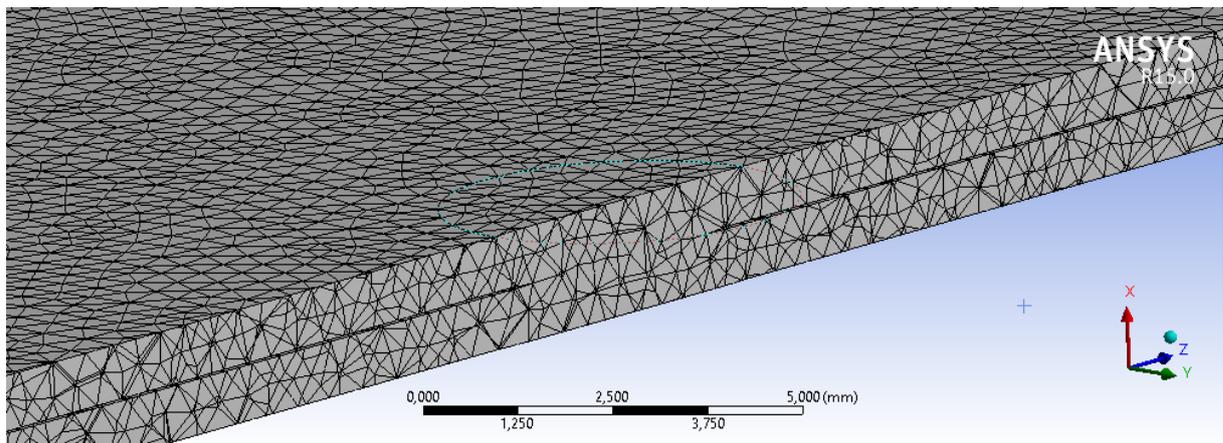


Figura 2.5.4.1 Malha 1.1 vista isométrica da lente.

A figura 2.5.4.2 apresenta a vista de topo do modelo com foco na região da lente.

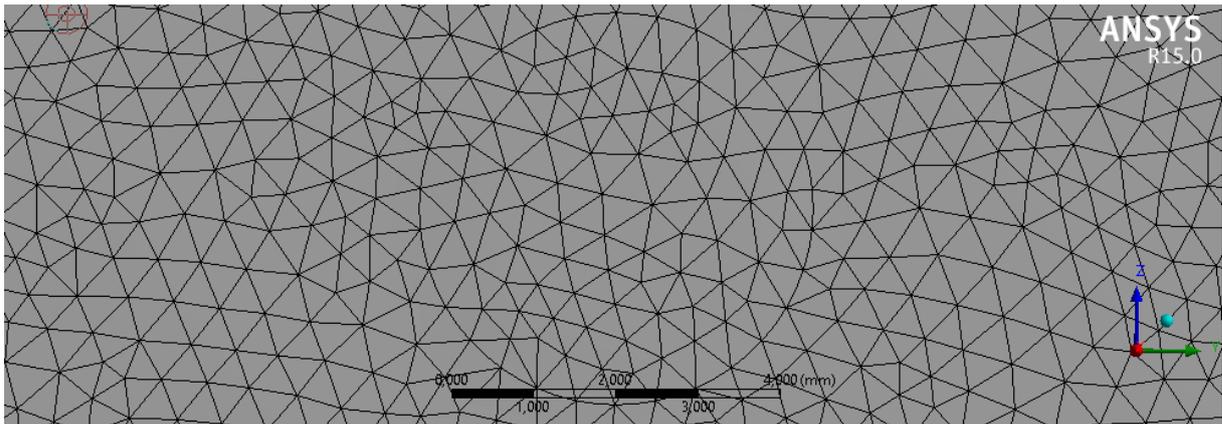


Figura 2.5.4.2 Malha 1.1 de topo do corpo de prova na região da lente.

A figura 2.5.4.3 apresenta o corte da seção transversal da lente ao sentido de posicionamento dos eletrodos.

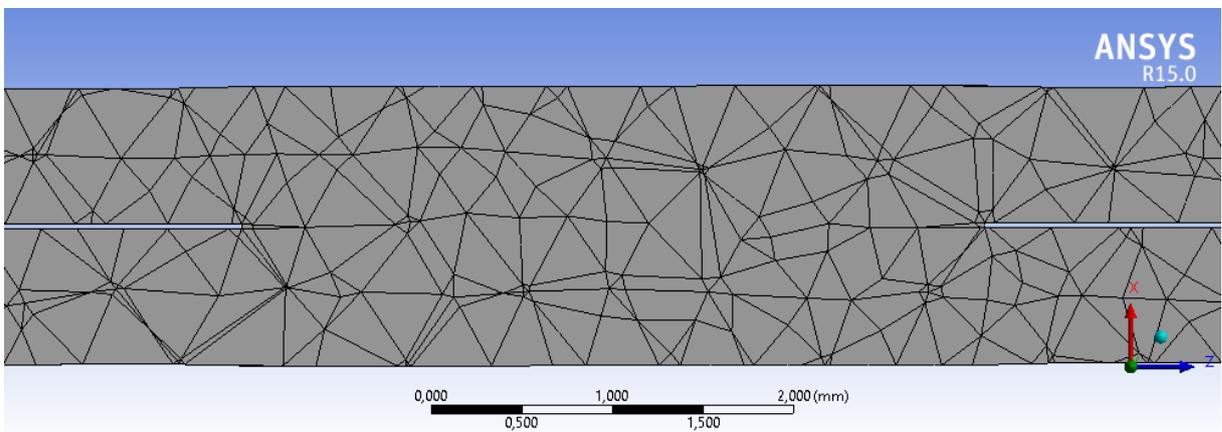


Figura 2.5.4.3 Malha 1.1 de corte da região da lente.

A figura 2.5.4.4 apresenta o corte da seção transversal da lente ao sentido de posicionamento dos eletrodos com os resultados de simulação.

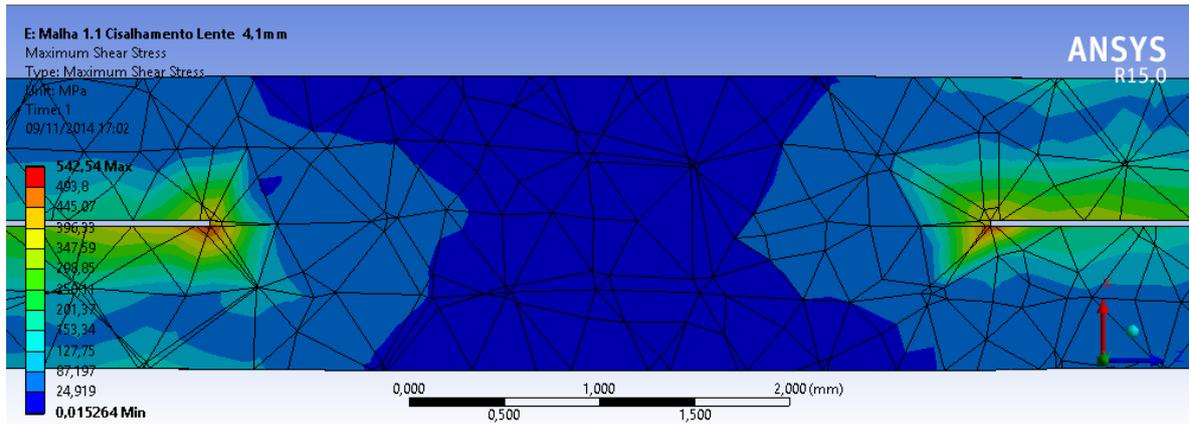


Figura 2.5.4.4 Resultado da malha 1.1 de corte da região da lente.

Nesta primeira Análise o modelo apresentou tensão máxima de 542,5 Mpa e a região de maior concentração de tensão apresentou geometrias com transição menos suave.

2.5.4.2. Malha 1.2;

A malha 1.2 foi elaborada com base na malha 1.1, porém com maior refinamento de elementos sobre toda peça, conforme descrito na Tabela 18.

Tabela 18 Parâmetros da Malha 1.2

Parâmetros da malha	
Tamanho de elemento	0,1 à 0,35 mm
Menor comprimento de arestas	0,75 mm
Suavização	Alta
Tipo de elemento	Triangular
Nº de nós	2671856
Elementos	1751207

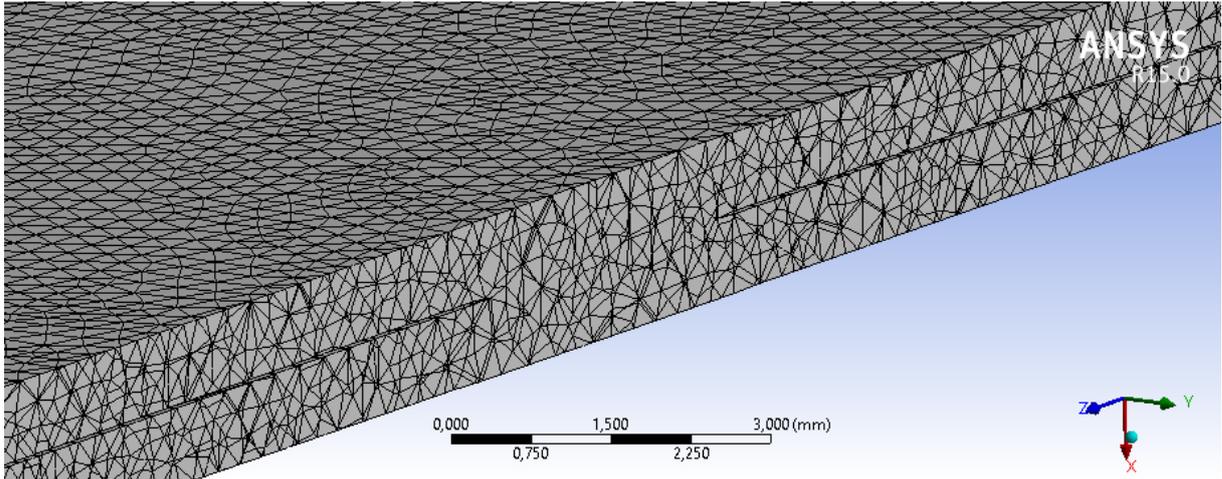


Figura 2.5.4.5 Malha 1.2 vista isométrica da lente.

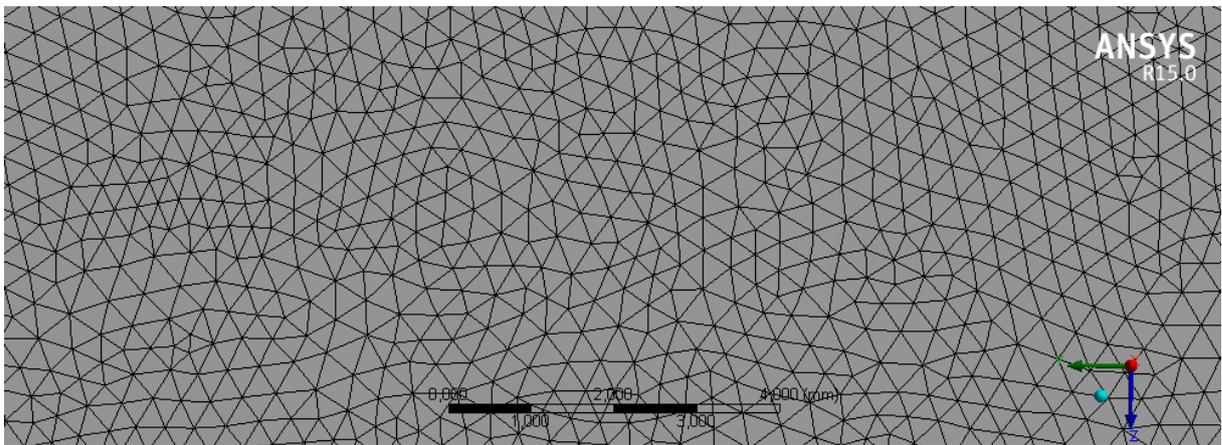


Figura 2.5.4.6 Malha 1.2 de topo do corpo de prova na região da lente.

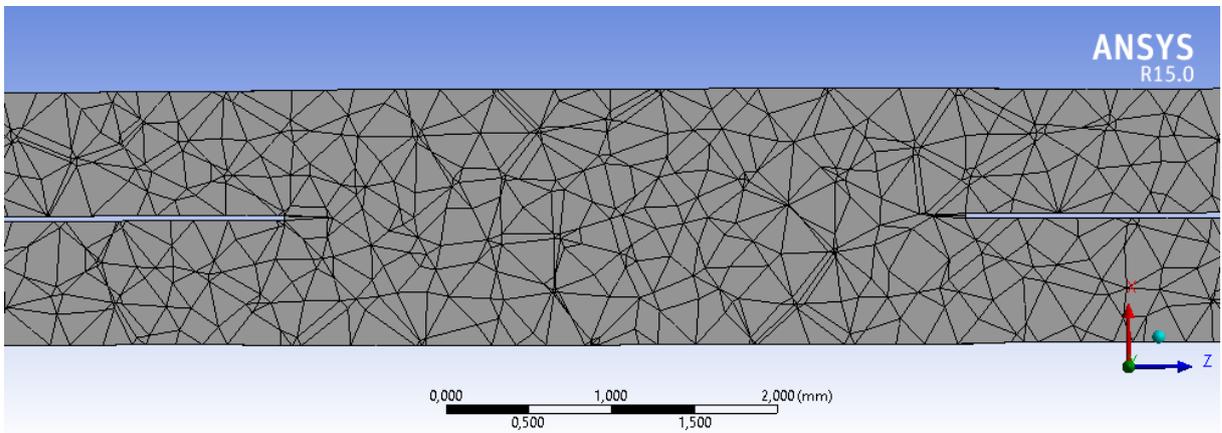


Figura 2.5.4.7 Malha 1.2 de corte da região da lente.

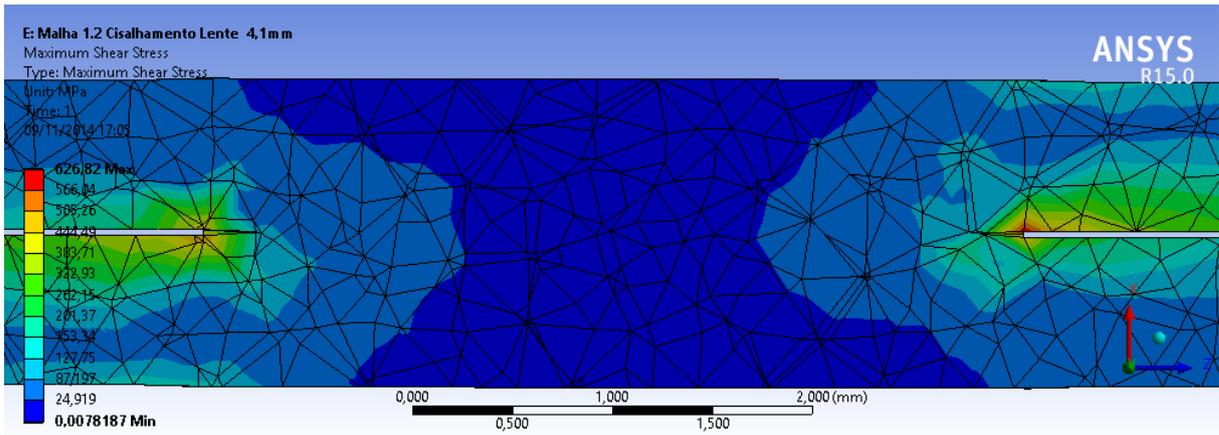


Figura 2.5.4.8 Resultado da malha 1.2 de corte da região da lente.

Nesta primeira Análise o modelo apresentou tensão máxima de 626,8 Mpa. Com este modelo refinado, houve a presença de tensões máximas maiores.

2.5.4.3. Malha 1.3;

A malha 1.3 foi elaborada com base na malha 1.1, porém com maior refinamento de elementos sobre toda peça, conforme descrito na Tabela 19.

Tabela 19 Parâmetros da Malha 1.3

Parâmetros da malha	
Tamanho de elemento	0,1 à 0,3 mm
Menor comprimento de arestas	0,75 mm
Suavização	Alta
Tipo de elemento	Triangular
Nº de nós	4012558
Elementos	2664800

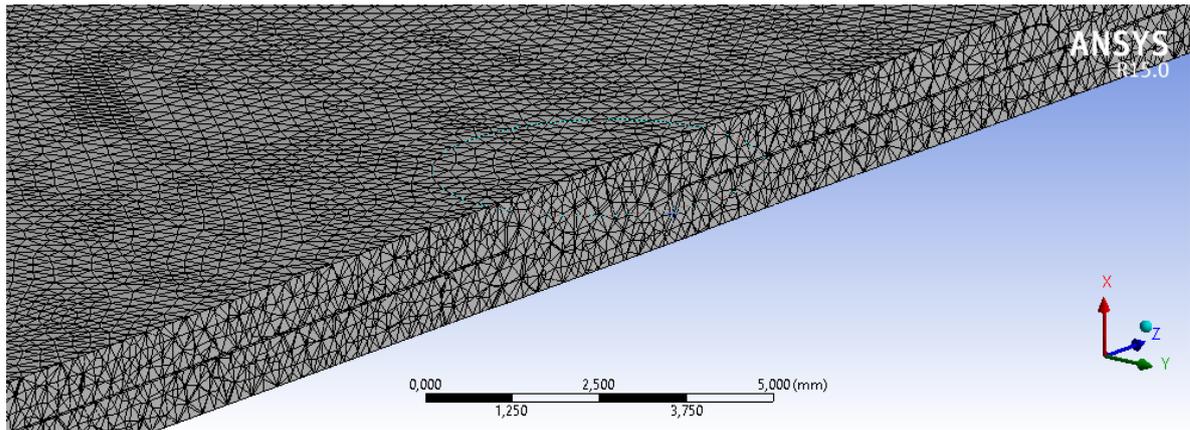


Figura 2.5.4.9 Malha 1.3 vista isométrica da lente.

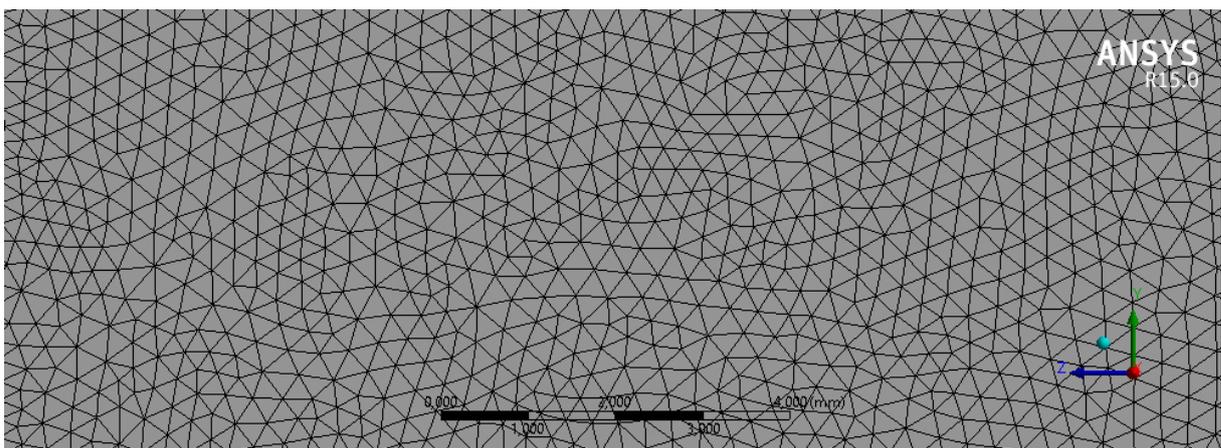


Figura 2.5.4.10 Malha 1.3 de topo do corpo de prova na região da lente.

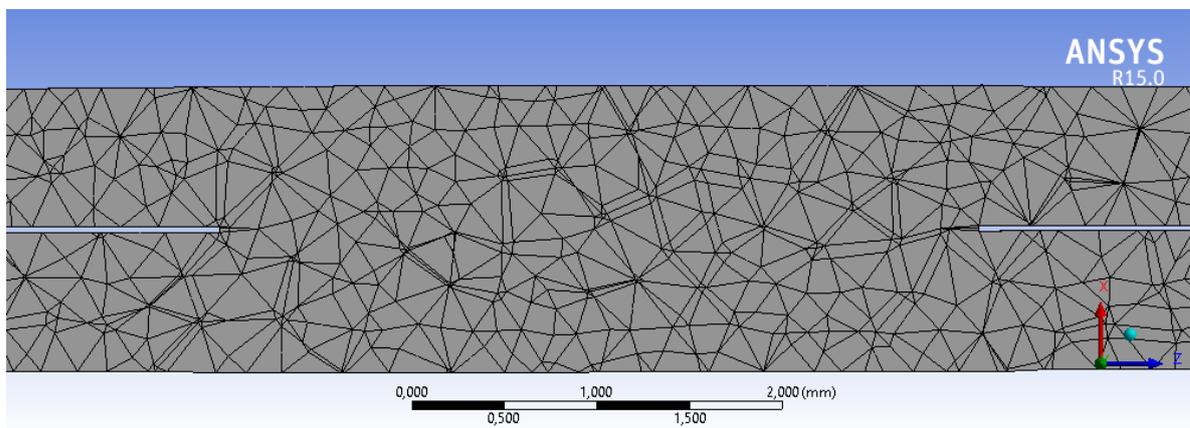


Figura 2.5.4.11 Malha 1.3 de corte da região da lente.

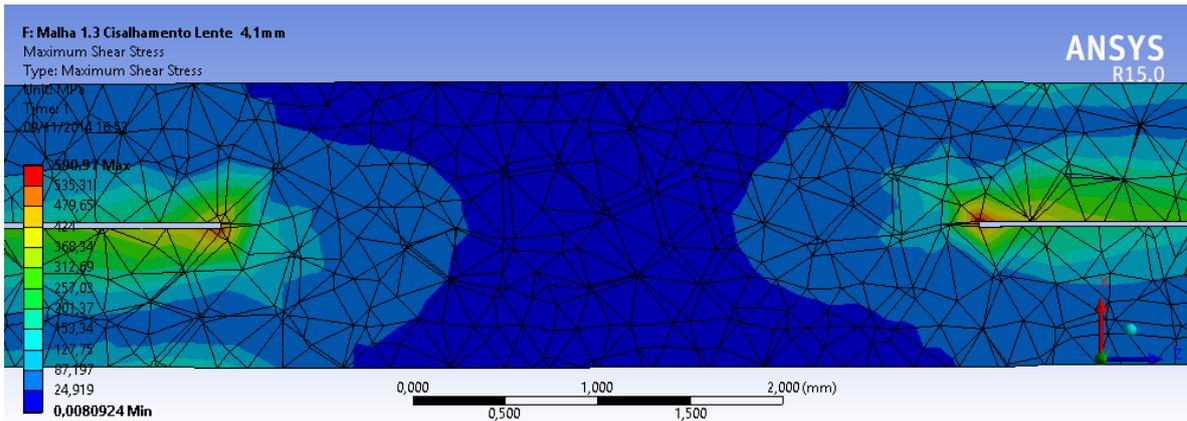


Figura 2.5.4.12 Resultado da malha 1.3 de corte da região da lente.

Nesta primeira Análise o modelo apresentou tensão máxima de 590,9 Mpa.

2.5.4.4. Malha 2.1;

A malha 2.1 foi elaborada com base na malha 1.3, porém com maior refinamento de elementos local na lente, conforme descrito na Tabela 20.

Tabela 20 Parâmetros da Malha 2.1

Parâmetros da malha	
Tamanho de Elemento	0,1 à 0,3 mm
Comprimento de pontos mínimo	0,75 mm
Suavização	Alta
Tipo de elemento	Triangular
Nº de nós	4292286
Qtd. De Elementos	2864010
Refinamento local	
Tamanho de Elemento	0,08 mm
Comportamento	Suave

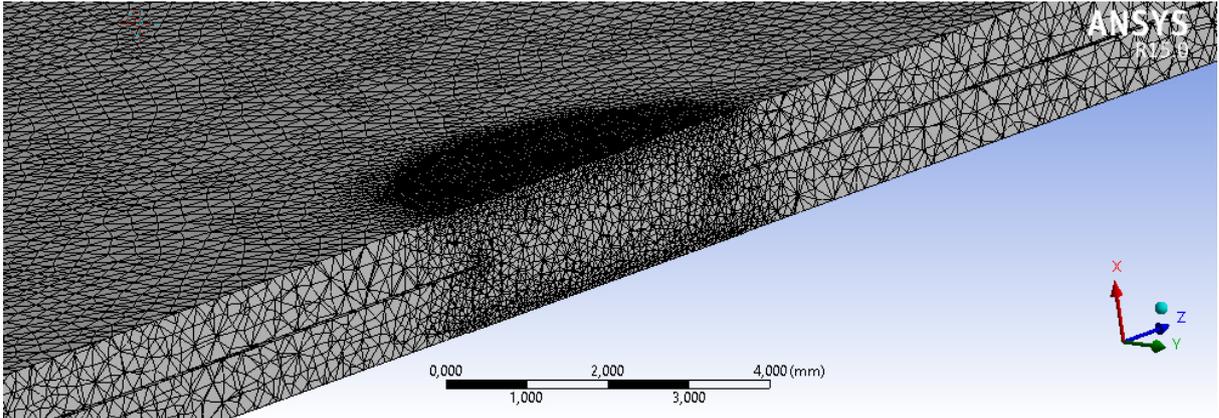


Figura 2.5.4.13 Malha 2.1 vista isométrica da lente.

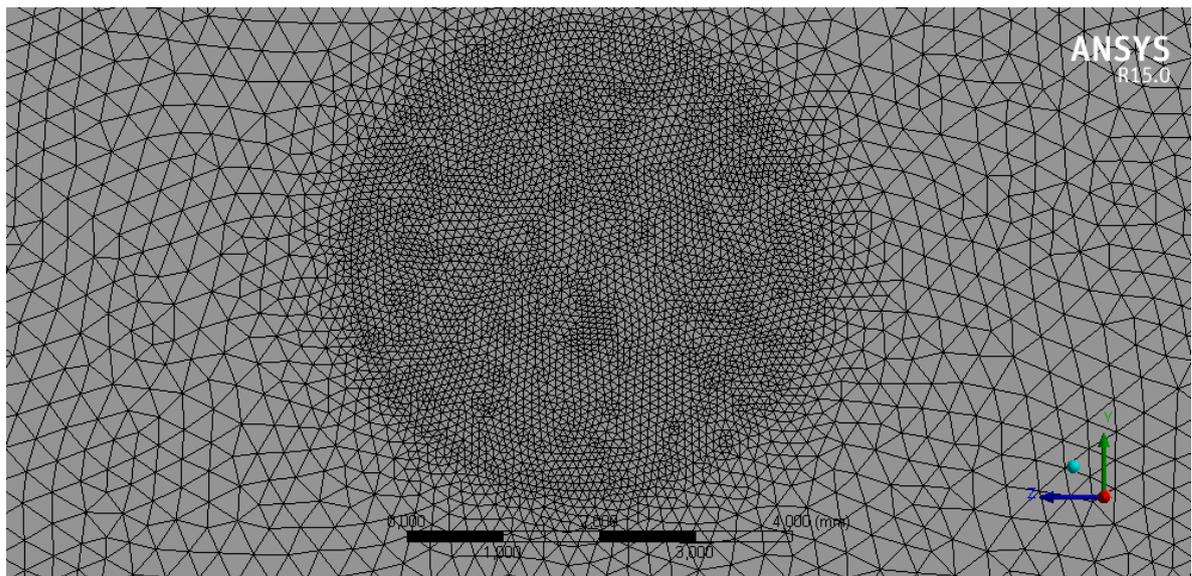


Figura 2.5.4.14 Malha 2.1 de topo do corpo de prova na região da lente.

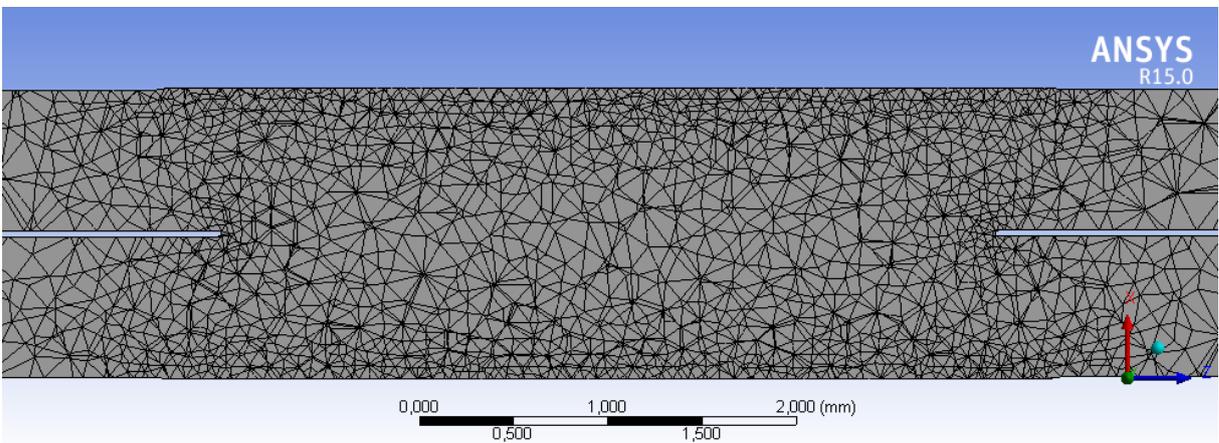


Figura 2.5.4.15 Malha 2.1 de corte da região da lente.

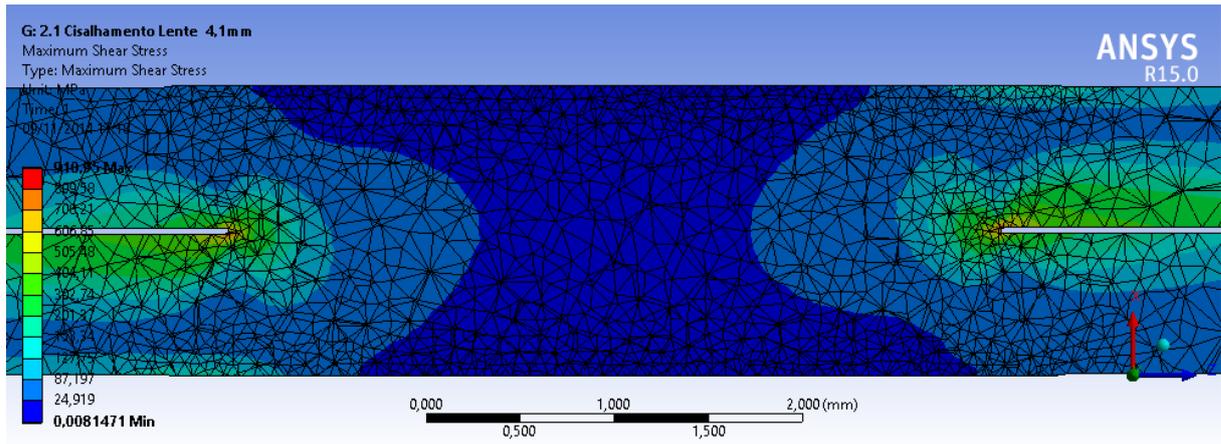


Figura 2.5.4.16 Resultado da malha 2.1 de corte da região da lente.

Nesta primeira Análise o modelo apresentou tensão máxima de 910,9 Mpa.

2.5.4.5. Malha 2.2;

A malha 2.2 foi elaborada com base na malha 1.3, porém com maior refinamento de elementos local na lente, conforme descrito na Tabela 21.

Tabela 21 Parâmetros da Malha 2.2

Parâmetros da malha	
Tamanho de Elemento	0,1 à 0,3 mm
Comprimento de pontos mínimo	0,75 mm
Suavização	Alta
Tipo de elemento	Triangular
Nº de nós	4784892
Qtd. De Elementos	3214584
Refinamento local	
Tamanho de Elemento	0,05 mm
Comportamento	Suave

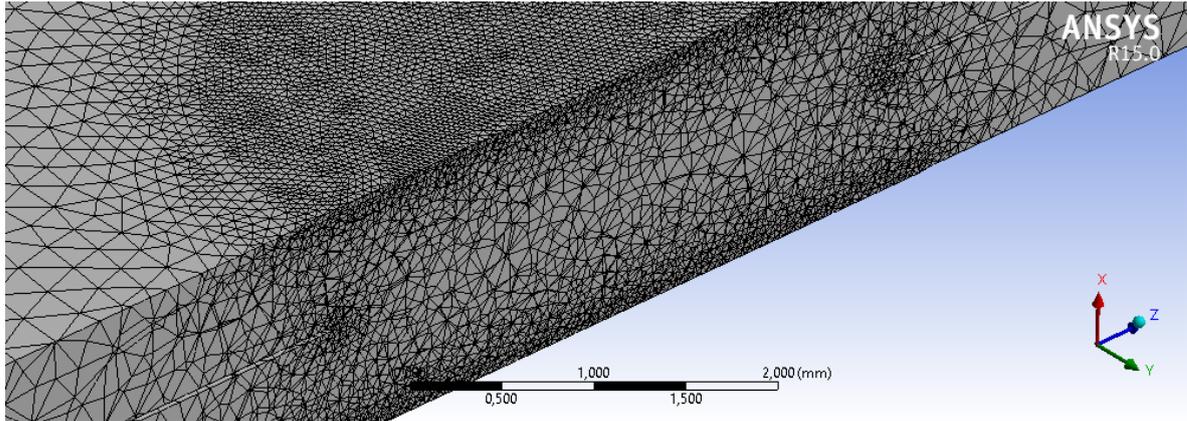


Figura 2.5.4.17 Malha 2.2 vista isométrica da lente.

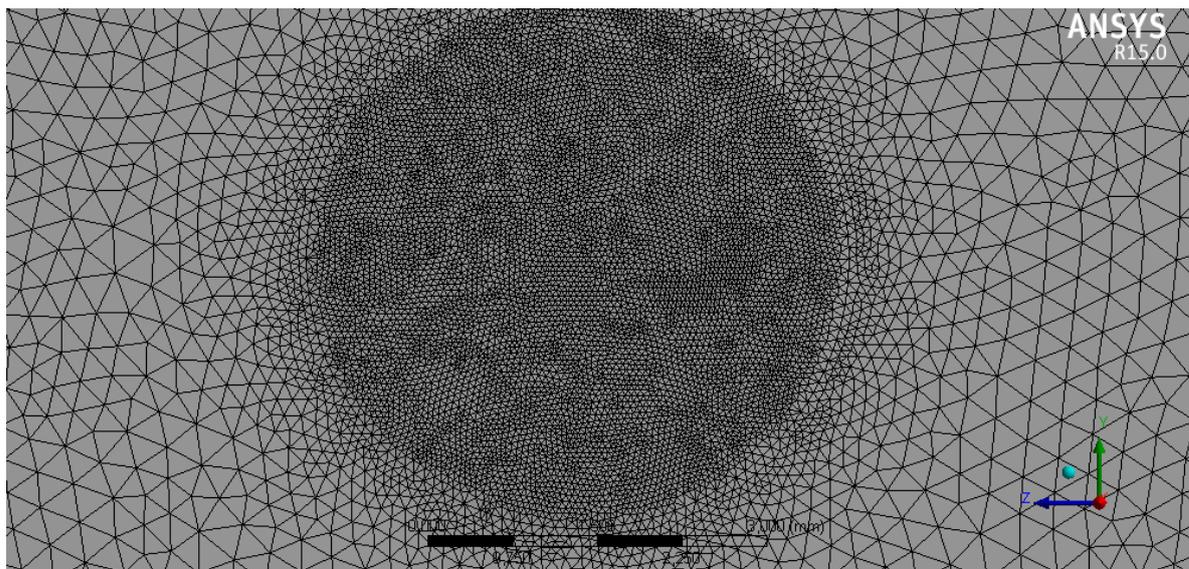


Figura 2.5.4.18 Malha 2.1 de topo do corpo de prova na região da lente.

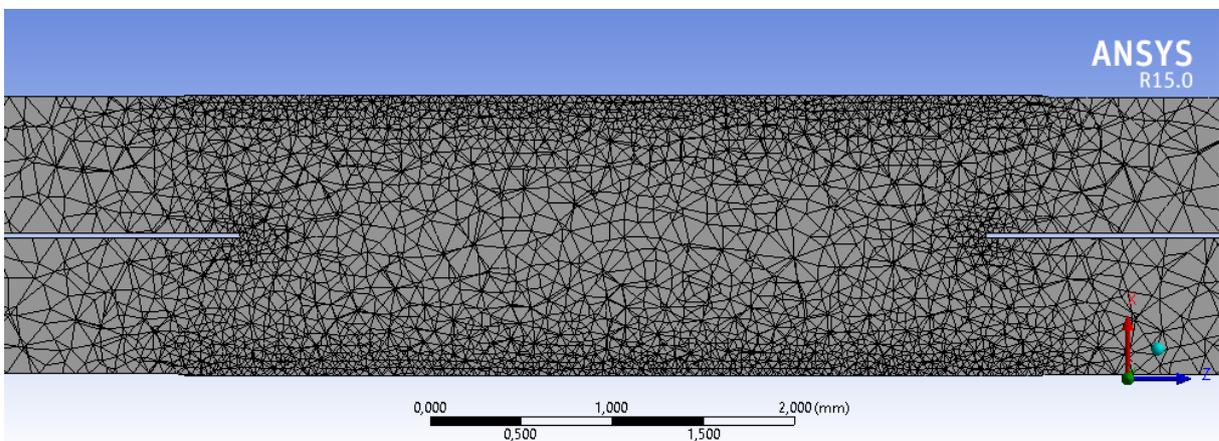


Figura 2.5.4.19 Malha 2.2 de corte da região da lente.

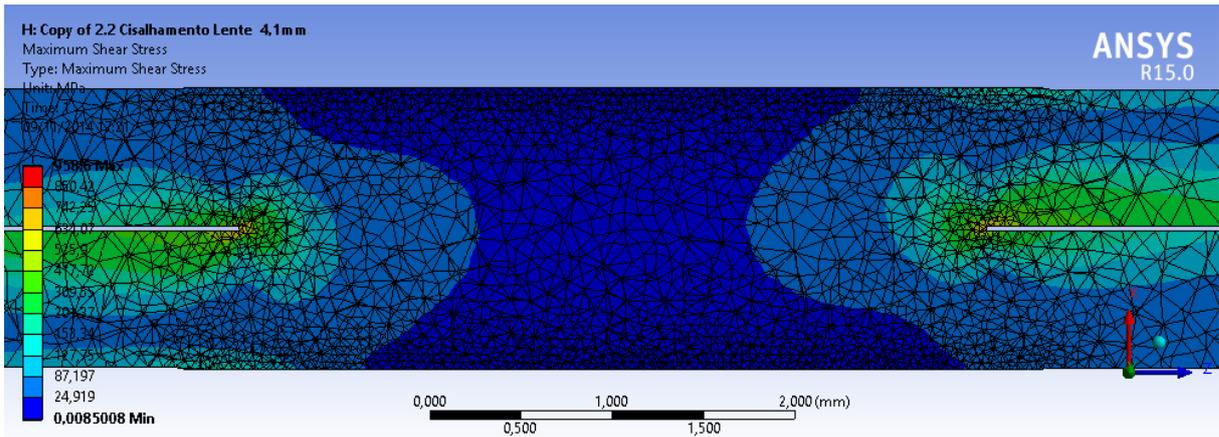


Figura 2.5.4.20 Resultado da malha 2.2 de corte da região da lente.

Nesta primeira Análise o modelo apresentou tensão máxima de 958,6 Mpa.

2.5.5. Análise de convergência

Os resultados das simulações estáticas utilizando as malhas acima apresentaram valores máximos o tanto quanto divergentes, entretanto a malha 1.3 obteve resultados que analisados, apresentaram resultados mais próximos do corpo de prova real, indicando os pontos de deformação, porém com um pequeno erro nos pontos de concentração de tensão. Os modelos de malha 1.1 e 1.2 obtiveram tensões mais baixas nas regiões de concentração de tensão, o que indica menor erro.

O gráfico da Figura 2.5.5.1 apresenta a análise de convergência dos resultados conforme refinamento da malha do modelo.

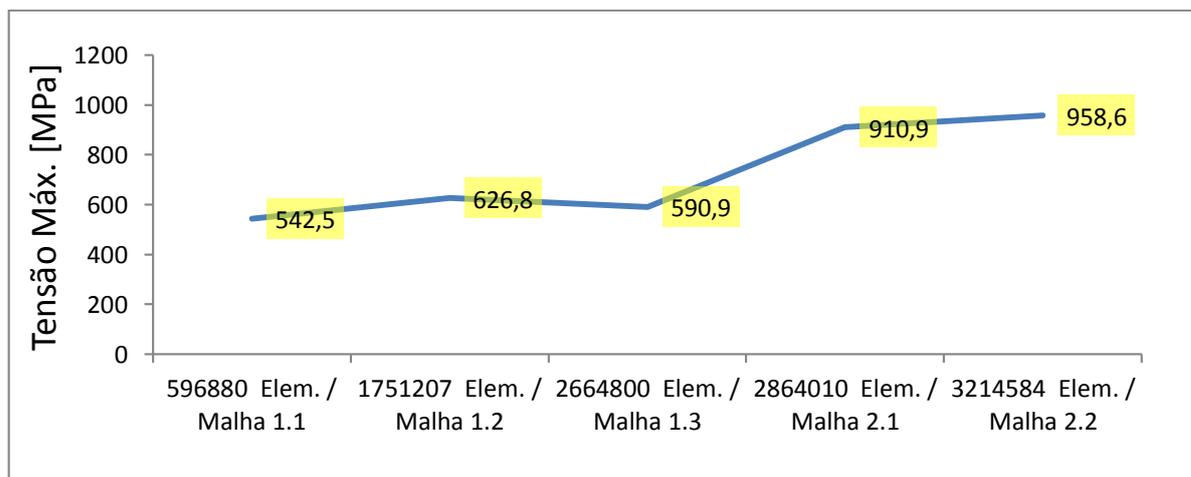


Figura 2.5.5.1 Gráfico de análise de convergência.

Foi considerado que ao refinar mais a malha o modelo apresenta maiores erros que resultam em tensões muito altas. Foi verificado que os modelos mais simples apresentam valores de tensões mais próximas dos resultados desejados.

2.5.6. Resultados

Os resultados obtidos pelo critério de tensão máxima apresentaram valores satisfatórios condizentes com o comportamento real, é possível observar que há uma região onde é encontrada alta tensão, que ultrapassam o limite de ruptura do material.

De fato, conforme o resultado dos ensaios simulados, comparado com os ensaios experimentais, considerando os mesmos valores de carregamento, é possível constatar que o modelo matemático apresenta as mesmas características de deformação e escoamento nas mesmas regiões, estas características podem ser visualizadas nas figuras abaixo:

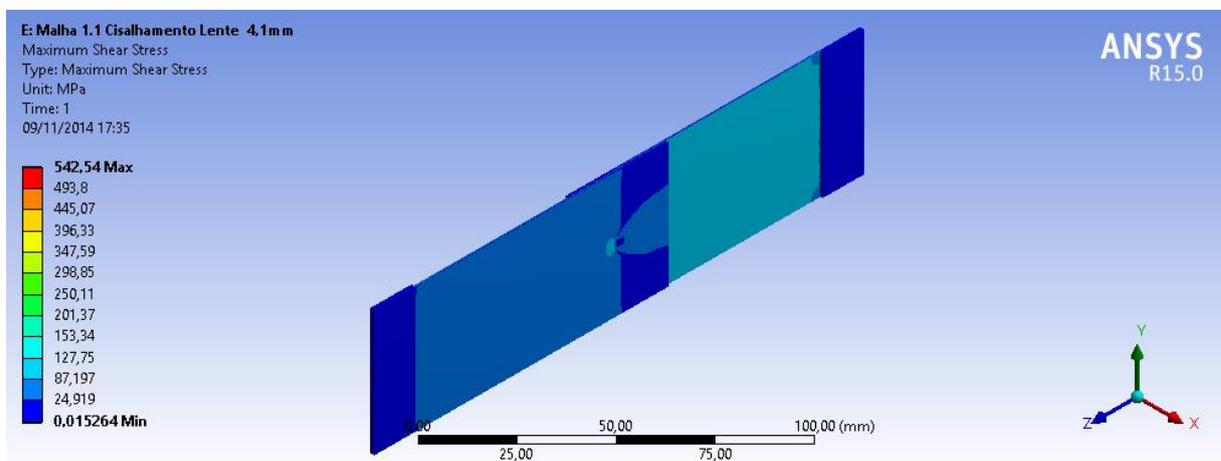


Figura 2.5.6.1 Vista isométrica do resultado das tensões aplicadas ao corpo de prova

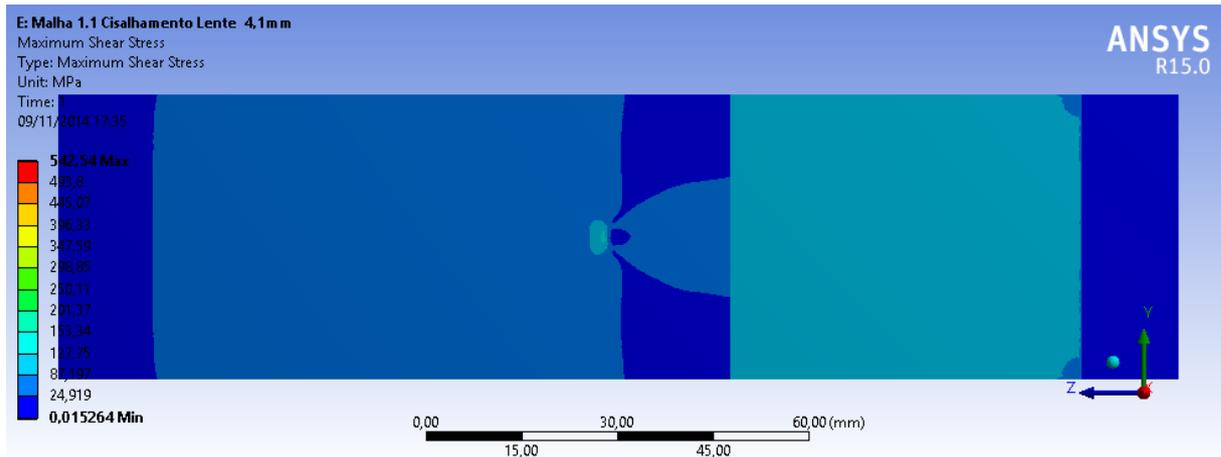


Figura 2.5.6.2 Vista de topo das tensões aplicadas

A figura 2.5.6.3 apresenta o resultado da simulação e o comportamento das chapas ao serem tracionadas com carga nas suas extremidades. Comparando com o modelo experimental, ilustrado na figura 2.5.6.4, concluímos que a simulação apresentou comportamento de deflexão das chapas decorrente das cargas de cisalhamento sobre a lente de forma satisfatória.

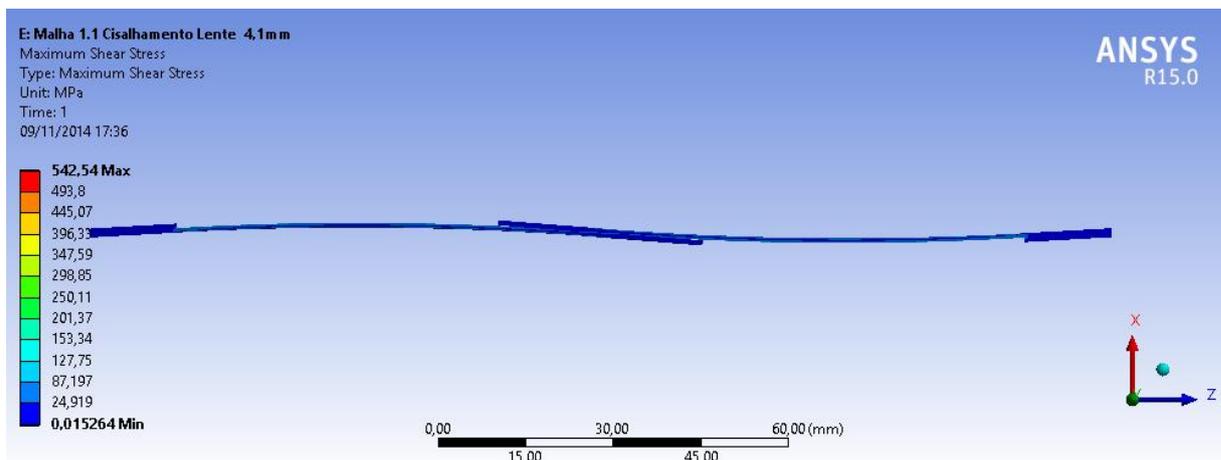


Figura 2.5.6.3 Vista da região da lente em corte das tensões aplicadas

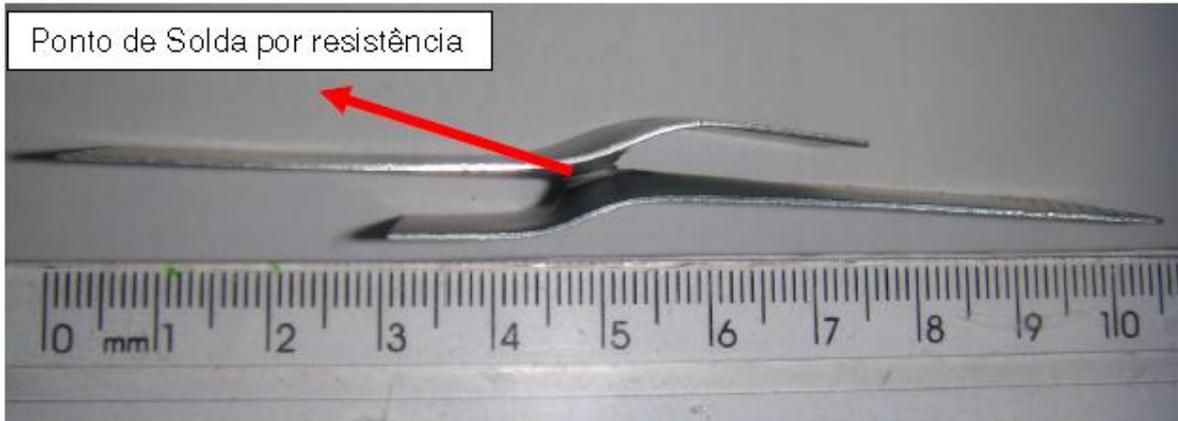


Figura 2.5.6.4 Deformação do corpo de prova em ensaio de cisalhamento[3]

A figura 2.5.6.5 demonstra a região da lente e a demarcação das regiões que possui maior concentração de tensão. Validando a simulação com o modelo experimental, uma vez que o modelo não se rompeu completamente, permanecendo as chapas unidas pela lente, porém com as regiões demarcadas em cores verde ao vermelho em escoamento da superfície.

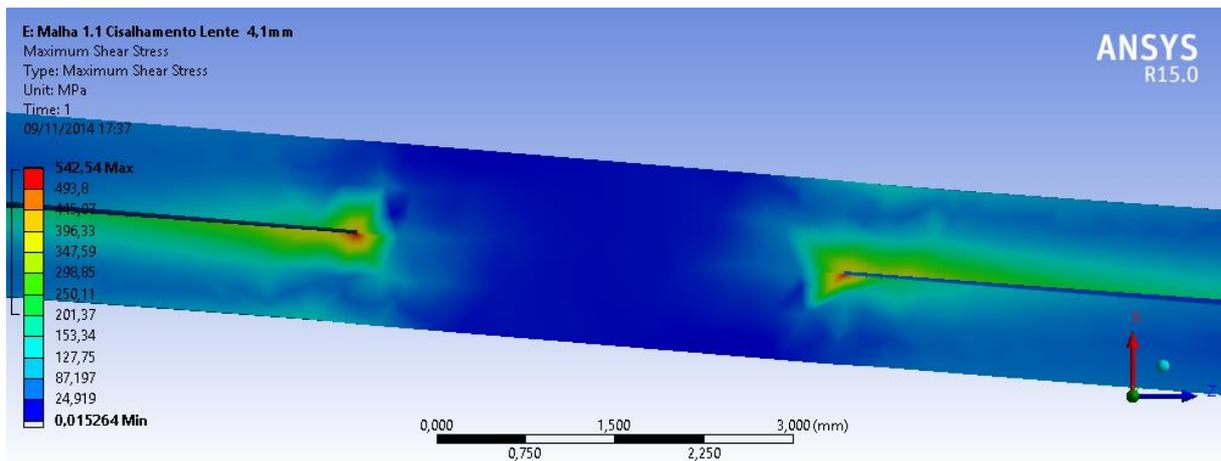


Figura 2.5.6.5 Vista da região da lente aproximada das tensões aplicadas com suavização

A figura 2.5.6.6 apresenta as faixas de tensões sem suavização.

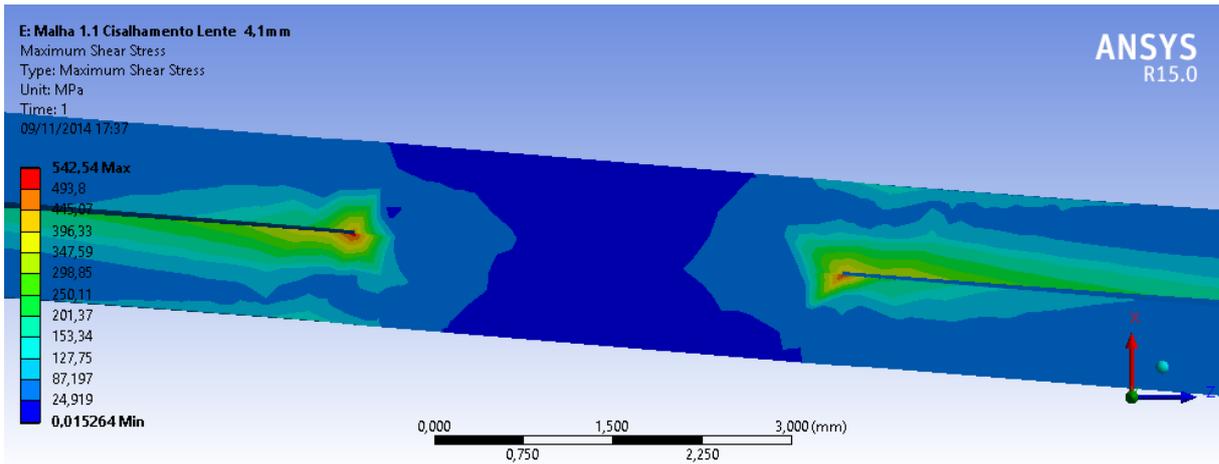


Figura 2.5.6.6 Vista da região da lente aproximada das tensões aplicadas sem suavização

A figura 2.5.6.7 apresenta a vista em corte da região interna da lente. Na região verde é possível visualizar maior concentração de tensão, resultando em falhas conforme apresentado no modelo ilustrado na Figura 2.5.6.8.

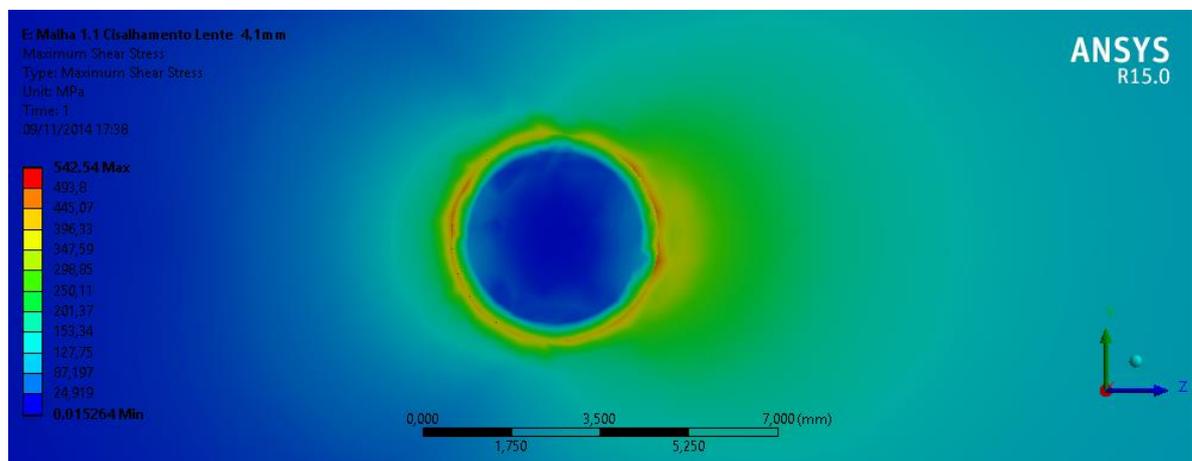


Figura 2.5.6.7 Vista de topo do corte da lente

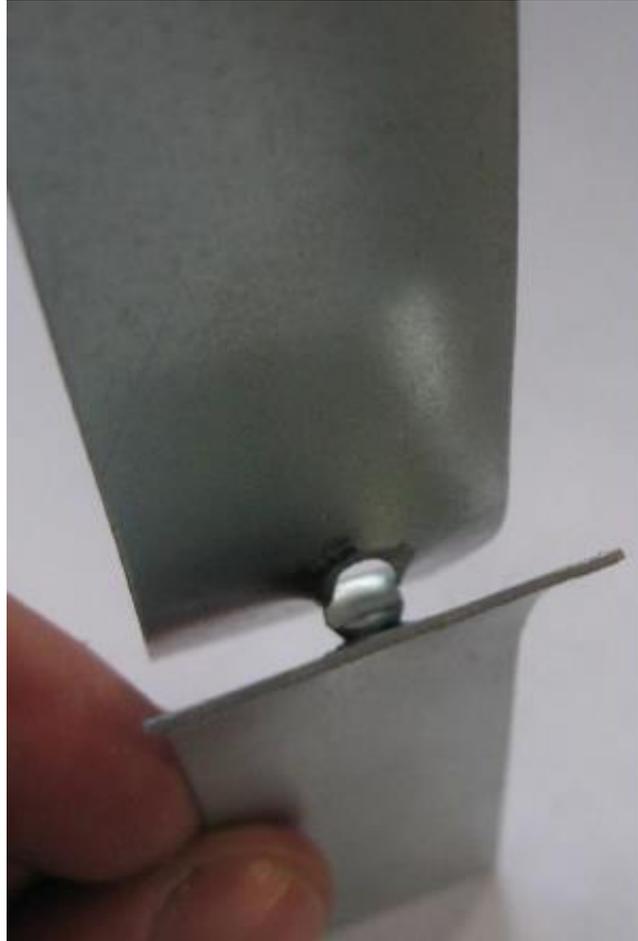


Figura 2.5.6.8 Vista de topo do corte da lente

A figura 2.5.6.9 apresenta a superfície externa da chapa, nesta ilustração é possível identificar nas cores azul clara a concentração de tensão nas regiões demarcadas.

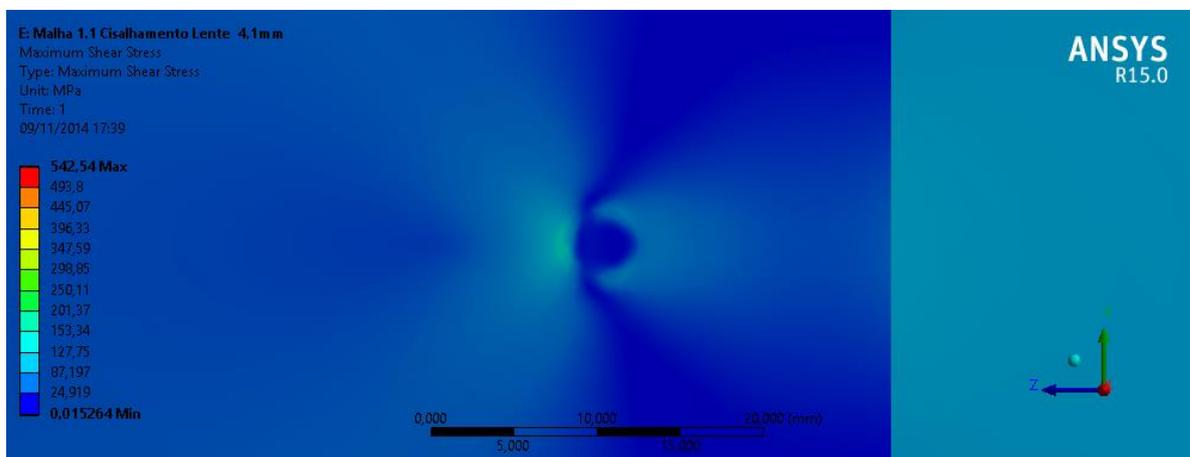


Figura 2.5.6.9 Vista de topo da face da chapa

3 Conclusão

Através deste estudo pôde-se observar que, observados os parâmetros corretos, dentro dos limites impostos pelo material base do CP e da máquina, é possível analisar numericamente o comportamento da peça durante um processo de união de geração de calor sobre a região em processo de soldagem a ponto RSW.

Foi verificado ainda, da necessidade da inclusão no modelo a aplicação, a pressão sobre toda a superfície do CP, visto que tal pressão faz significativa diferença final na distribuição do calor na junta soldada.

Os resultados apresentados até o presente momento são plenamente satisfatórios e condizentes com a realidade, levando a conclusão de que é possível mensurar as características da junta soldada, antevendo, desta forma, qual será seu comportamento, tanto no processo de soldagem em si quanto ao carregamento cisalhante, verificando assim sua resistência ao carregamento.

Os ensaios de cisalhamento pelo modelo matemático apresentaram resultados aceitáveis e condizentes com o modelo real salvando as altas tensões nos pontos concentradores de tensão. Estes pontos apresentaram valores muito altos, os quais o material não resistiria. Foi considerado que na região onde houve maior concentração de tensão, apresentou maior erro da malha, é sabido que os resultados das simulações dependeram muito do refinamento da malha e que existem possibilidades de melhoria, porém o objetivo foi atingido visto que foram analisados os parâmetros e processos, foi gerado um modelo matemático (simulação computacional) em que refletiu o comportamento próximo da realidade dentro dos parâmetros base utilizados, tanto da junta soldada quanto à resistência da junta soldada em determinados ensaios mecânicos. Comprovado finalmente que o modelo matemático proposto está de acordo com a realidade, apresentando assim uma opção ao ensaio empírico e testes para análise de resultados.

4 Trabalhos Futuros

Dando continuidade em tal trabalho é sugerido que a partir desta simulação, sejam testados em outros valores dos parâmetros, inclusive em outros materiais que não somente os aços IF, a fim de abranger uma gama maior de resultados além do refinamento tanto das malhas quanto das características de carregamento.

Referências bibliográficas

[1] MARCELO R. DE A. BARROS, “Estudo da automação de células de manufatura para montagens e soldagem industrial de carrocerias automotivas”, 2006.

[2] GILVAN P. ROSSI, “Estudo de correlação do comportamento de pontos de solda em corpos de prova pelo método dos elementos finitos”, 2007.

[3] JOANES, Silva Dias, Uma Metodologia para Otimização de Parâmetros de Soldagem Através de Solda por Resistência Aplicada em Chapas de Aço Interstitial Free – IF, CEFET/RJ, 2011.

[4] AURES, J. E. V., “Estudo da Formação, Geometria, e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistência: Uma Abordagem Estatística, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília – UNB, Brasília, Brasil, 2006.

[5] BRANCO, H. L. O., “Avaliação de Capas de Eletrodo Utilizadas na Soldagem por Resistência de Chapas Galvanizadas Automotivas”, Curitiba, 2004.

[6] FUKUDA, N., SHIMIZU, M., Effect of Titanium Addition on the Improvement of r-value in Cold-Rolled Sheet Steels, Journal of Japan Society for Technology of Plasticity, 13 (142), 1972, p. 841-850.

[7] HOOK, R. E., HECKLER, A.J., ELIAS, J.A., Texture in Deep-Drawing Columbium (Nb)- Treated Interstitial- Free Steels, Metallurgical Transaction A, 6A, 1975, p. 1683-1692.

[8] TOKUNAGA, Y., YAMADA, M., ITOH, K.. Efficacy of Combination Addition of Nb and Ti on the Mechanical Properties of Extra Low Carbon Steel Sheets, TETSU-TOHAGANÉ, N° 73, 1987, p. 109-116.

[9] TSUNOYAMA, K., SATOH, S., YAMAZAKI, Y., ABE, H. "Recent Advances in interstitial – Free Steels for Formable Cold – Roller Sheet Applications". In: METALLURGY OF VACUUM-DEGASSED STEEL PRODUCTS, Ed. R. Pradhan, 1990, p. 127-140.

[10] BLECK, Q., "Development of Cold – Roller Extra – Low Carbon Sheet Steels at Thyssen Stahl AG". Thyssen Stahl Publication. 1991.

[11] INCROPERA F. P.; Fundamentals of heat and mass transfer, J. Wiley & Sons, USA, 1994. INCROPERA F. P.; Fundamentals of heat and mass transfer, J. Wiley & Sons, USA, 1994.

[12] SHIGLEY, J.; MISCHEKE, C; BUDYNAS, R; Projeto de Engenharia Mecânica, 7ªed. – São Paulo: Bookman, 2005.

[13] Larsson, J.K., "Tecnologia De União De Materiais Na Indústria Automotiva", Revista da Soldagem, 2010.

- [14] KRISTIÁN, Máthis, et al (2009). Microstructural evolution of equal-channel angular pressed interstitial-free steel. *International Journal of Materials Research: Vol. 100, No. 6*, pp. 834-837.
- [15] MARQUES, Rodrigo José Alves, *Avaliação da Resistência à Corrosão de Aços IF Revestidos com Zinco e Ligas de Zinco-Ferro Destinados à Indústria Automobilística*, UFMG, 2008.
- [16] MODENESI, P. J., MARQUES, P. V. e BARARCARENSE, A. Q., “Soldagem Fundamentos e Tecnologia, UFMG, 2007
- [17] NORMA ANSI/AWS/SAE D8.9-97, ‘Recommended practices for test methods and evaluation the resistance spot welding behavior of automotive sheet steels’, 1997.
- [18] NORMA German DVS 2923 - ‘Resistance spot welding’, DVS 2923, German Standard. Düsseldorf, Germany, 1986.
- [19] OLIVEIRA, A.F. Caracterização de um aço IF após a relaminação num laminador de encruamento. *Dissertação de Mestrado. USP, 2010.*
- [20] POUVARANVARI, M. e MARASHI, S. P. H., *Critical Review Of Automotive Steels Spot Welding Process*, 2013.
- [21] WILLIAMS, N. T., PARKER, J.D., “Review of Resistance Spot Welding of Steel Sheets, Part1, 2004.

[22] GIOVANNI M. TEIXEIRA, MARTIN P. KESSELER, ESSS e Prof. CLOVIS R. MALISKA – UFSC, Artigo Técnico: “Fontes de erro: identificar, quantificar e reduzir a intervalos aceitáveis”

[23] SILVA, D.B.,COMITRA, T.F., “Estudo da laminação de Aços IF no Laminador de tiras a Quente da COSIPA”. 43º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 2006.

[24] J. ZHAO, Y.ZHOU, “Weldability Improvement Using Coated Electrodes for RSW of HDG Steel.

[25] X. KONG, Q. YANG, B. LI, G. ROTHWELL, R. ENGLISH, X.J. REN. “Numerical Study of Strengths of Spot-welded joints of Steel”